



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**MOŽNOSTI VYUŽITÍ LEHKÉHO KAMENIVA PRO
VÝROBU VELMI LEHKÝCH BETONŮ**

POSSIBILITIES OF USING LIGHTWEIGHT AGGREGATE FOR LIGHTWEIGHT CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jeroným Jahn

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN SEDLMAJER, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jeroným Jahn
Název	Možnosti využití lehkého kameniva pro výrobu velmi lehkých betonů
Vedoucí práce	Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. Mehta, P., K. Concrete - Microstructure, Properties and Materials
2. Collepardi, M. Moderní beton
3. Limbachiya, M., Meddah, M. S., Fotiadou, S., Performance of granulated foam glass concrete, Construction and Building Materials, Volume 28, Issue 1, March 2012, 759-768, ISSN 0950-0618
4. Taylor, P., C. Curing Concrete
5. Halahyja, M. Stavební fyzika: Stavební tepelná technika
6. ČSN EN 13055-1 - Pórovité kamenivo - Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty
5. Tuzemské a zahraniční publikace v odborných časopisech, technické normy a jiná doplňková literatura.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Téma diplomové práce bude věnováno možnostem využití lehkého kameniva pro výrobu velmi lehkých betonů se zaměřením na tepelně izolační vlastnosti. Především by se mělo jednat o využití drčeného pěnového skla, jako vhodného kameniva, které je vyráběno z recyklovaného skla a zbytkové suroviny při recyklaci skla. Zbytková surovina je pro sklářský průmysl obtížně využitelná a uplatnění nachází ve výrobě pěnového skla. Jedná se o materiál s velmi nízkou objemovou hmotností a dobrými tepelněizolačními vlastnostmi.

Cílem teoretické části diplomové práce bude studium vlastností lehkého kameniva, které se vyznačuje především nízkou objemovou hmotností, velmi dobrými tepelně izolačními vlastnostmi a jeho vhodností pro využití v lehkých betonech nízké objemové hmotnosti, jako betonů pro tepelně izolační vrstvy. Zaměření by se mělo týkat kameniva z pěnového skla a možností, jak regulovat a optimalizovat složení betonové směsi pro dosažení požadovaného poměru mechanických a tepelněizolačních vlastností. V teoretické části by měla být provedena rešerše o využití pěnového skla v kombinaci s cementem, shrnutí aktuálních poznatků s využitím tohoto kameniva. Součástí rešerše by mělo být i popsání možných rizik, jako je například alkalicko-křemičitá reakce.

V praktické části bude provedena analýza kameniva z pěnového skla, stanovení materiálových vlastností kameniva. Dále bude navrženo složení lehkých betonů na bázi kameniva z pěnového skla. Z navržených receptur betonu pak budou vyrobeny zkušební tělesa pro stanovení základních mechanických a fyzikálních vlastností. Především bude sledován součinitel tepelné vodivosti navržených betonů a možnost regulace tepelněizolačních vlastností a mechanických vlastností tak, aby bylo možné dosahovat požadovaných vlastností v závislosti na konkrétní aplikaci.

V diplomové práci bude provedeno hodnocení dosažených výsledků pomocí tabulek a grafů. Současně bude hodnocení praktických dopadů pro praxi. Práce bude zpracována odpovídající a požadovanou formou, v rozsahu 60 až 80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

DIPLOMOVÁ PRÁCE SE VE SVÉ TEORETICKÉ ČÁSTI ZAMĚŘUJE NA VYUŽITÍ LEHKÉHO KAMENIVA PRO VÝROBU VELMI LEHKÝCH BETONŮ, ZAMĚŘUJE SE PŘEDEVŠÍM NA JEJICH TEPELNĚ IZOLAČNÍ VLASTNOSTI. NEJVĚŠÍ POZORNOST JE VĚNOVÁNA LEHKÉMU KAMENIVU, VYRÁBĚNÉHO ZE SKELNÉHO RECYKLÁTU, PĚNOVÉMU SKLU. JSOU ZDE POPSÁNY DOPOSUD VYRÁBĚNÉ GRANULÁTY Z PĚNOVÉHO SKLA, JEJICH VÝROBA, VLASTNOSTI A POUŽITÍ. JSOU POPSÁNY I JINÁ LEHKÁ KAMENIVA, NEJBĚŽNĚJI POUŽÍVANÁ PRO VÝROBU VELMI LEHKÝCH BETONŮ. KE KONCI TEORETICKÉ ČÁSTI JSOU POPSÁNA MOŽNÁ RIZIKA, SPOJENÁ S VÝROBOU A POUŽITÍM LEHKÝCH BETONŮ. V PRAKTICKÉ ČÁSTI JE PROVEDENA ANALÝZA KAMENIVA Z PĚNOVÉHO SKLA A STANOVENÍ VLASTNOSTÍ SKELNÉHO GRANULÁTU. V DALŠÍ ČÁSTI JSOU POTÉ OPTIMALIZOVÁNY RECEPTURY BETONU, KDE JE JAKO PLNIVO POUŽITO KAMENIVO Z PĚNOVÉHO SKLA. NÁSLEDNĚ JSOU NA VYROBENÝCH VELMI LEHKÝCH BETONECH SLEDOVÁNY MECHANICKÉ A TEPELNĚ IZOLAČNÍ VLASTNOSTI.

KLÍČOVÁ SLOVA

VELMI LEHKÝ BETON, LEHKÁ KAMENIVA, GRANULÁT Z PĚNOVÉHO SKLA, ASR

ABSTRACT

DIPLOMA THESIS IN THEIR THEORETICAL PART ARE FOCUSE , USE LIGHTWEIGHT AGGREGATES FOR THE PRODUCE OF VERY LIGHTWEIGHT CONCRETE, FOCUSES PRIMARILY ON FOAM GLASS AGGREGATES. THERE ARE ALSO MENTIONED OTHERS LIGHTWEIGHT AGREGATES, WHICH WE ARE USE FOR PRODUCE O VERY LIGHTWEIGHT CONCRETE. THEN THERE ARE RISKS UNITED WITH VERY LIGHTWEIGHT CONCRETE. IN THE PRACTICAL PART IS THE PROPERTY ANALLYSIS OF FOAM GLASS AGGREGATES, DESIGN RECIPE VERY LIGHTWEIGHT CONCRETE AND MONITORED MECHANICAL A THERMAL PROPERTIES OF THESE CONCRETE.

KEYWORDS

VERY LIGHTWEIGHT CONCRETE, LIGHTWEIGHT AGGREGATES, FOAM GLASS AGGREGATES, ASR

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Jeroným Jahn *Možnosti využití lehkého kameniva pro výrobu velmi lehkých betonů*. Brno, 2018. 77 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 2. 1. 2018

Bc. Jeroným Jahn
autor práce

Poděkování

Největší poděkování patří mé rodině a přítelkyni za podporu ve studiu.

Moc děkuji Ing. Martinu Sedlmajerovi, Ph.D., jako vedoucímu diplomové práce a panu Vladimíru Klímovi za pomoc v laboratořích.

1. ÚVOD	10
2. LEHKÝ BETON	12
3. LEHKÉ KAMENIVO	18
3.1 Kamenivo na bázi expandovaných hlín	19
3.2 Kamenivo na bázi popílku	21
3.3 Kamenivo na bázi pěnových skel	22
4. PĚNOVÉ SKLO	24
4.1 Vstupní suroviny a výroba	24
4.2 Drcené kamenivo z pěnového skla	25
4.3 Oválné kamenivo z pěnového skla	27
5. PROBLEMATIKA VÝROBY LEHKÝCH BETONŮ	30
6. ALKALICKO-KŘEMIČITÁ REAKCE (ASR)	31
6.1 Úvod, historie a charakteristika ASR	31
6.2 Základní složky pro vznik ASR	32
6.3 Princip vzniku, rozpínání a následky ASR	34
7. CÍLE PRÁCE	36
8. PRAKTICKÁ ČÁST	37
8.1 Metodika práce	37
8.2 Použité materiály	39
8.3 I. Etapa-stanovení vlastností kameniva z pěnového skla	39
8.4 II. Etapa-návrh receptur betonů	47
8.4.1 Návrh velmi lehkých mezerovitých betonů MCB	47
8.4.2 Návrh lehkých hutných betonů LC	48
8.5 III. Etapa-výroba a zkoušení vlastností betonů MCB a LC	50
8.5.1 Zkoušení čerstvého betonu	52
8.5.2 Zkoušení ztvrdlého betonu po 7 dnech zrání	54
8.5.3 Zkoušení ztvrdlého betonu po 28 dnech zrání	57
9. DISKUZE A ZÁVĚR	69
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	73
SEZNAM TABULEK	75
SEZNAM OBRÁZKŮ	76

1. ÚVOD

V dnešní době je kladen stále větší důraz na ekologické hospodářství v oblasti využívání neobnovitelných zdrojů surovin, protože přírodních zdrojů neustále ubývá, a ne jinak tomu bude do budoucna. Ve stavebnictví jsou objemy používaných materiálů z přírodních zdrojů velmi vysoké. Kupříkladu výroba betonu, vezmeme-li tři základní složky, vodu, cement a kamenivo. Zcela správným a nezbytným krokem v celém koloběhu využívání surovin je recyklace, která pomáhá využívat materiály a suroviny při další výrobě. Proto jsou v odpadovém hospodářství tříděny materiály, které je možné opětovně využívat v jakémkoli odvětví průmyslu, tak aby dopad odpadních či sekundárních surovin na životní prostředí byl co možná nejmenší. Je snaha o maximální využití těchto surovin či materiálů pro další výrobu. Nezbytným elementem pro úspěšné využití odpadních či sekundárních produktů z výroby je také jejich ekonomická výhodnost, což zpravidla nebývá problém. Musí se však prokázat v daném případě jejich bezproblémová možnost zakomponování do požadovaného materiálu tak, aby nedošlo k negativnímu ovlivnění požadovaných výsledných vlastností daného materiálu.

Aktuálně se ukazují negativní prognózy také v oblasti vodního hospodářství, kde je obava z úbytku a nedostatku pitné vody. Šetření vodou při výrobě betonu je již běžné, a to vrácením části vody používané pro vymývání zpět do výrobního procesu. Snaha je také o snižování množství produkovaného cementu, respektive množství vyrobeného portlandského slínku. Důvody jsou především spojené s emisemi oxidu uhličitého, které při výrobě vznikají, ale také úsporou v těžbě vápence. Proto jsou v tomto směru hojně využívány příměsi do betonu, které mohou z části nahradit cement.

Velmi obtížným krokem v návrhu betonu je nahrazování přírodního kameniva, které má vynikající vlastnosti, alternativním kamenivem, které by bylo vyrobeno z recyklovaných materiálů. Problematická je i náhrada kameniva recyklovaným betonem, jako kamenivem. Důvodem je velká variabilita recyklovaného kameniva anebo zcela odlišné vlastnosti, které jsou po kamenivu vyžadovány. Toto platí především pro oblast konstrukčních betonů, kde je nezbytné využít prvotřídního kameniva, které je základem pro dobrý konstrukční beton. Je však možné využít kameniv z recyklovaných materiálů pro cílené aplikace při výrobě betonů, jako jsou například lehké betony či mezerovité betony. Takováto kameniva mají pak příznivý dopad na objemovou hmotnost betonu a také lepší tepelně izolační vlastnosti ve srovnání se

standardním cementovým betonem. Jedním z důvodů je i cena, která je u přírodních hutných kameniv velmi příznivá a zatím dostatečné zásoby přírodního kameniva. Toto se však bude s postupem času měnit a budeme nuceni zacházet s odpadem, ať už jakýmkoliv, šetrněji a nebude cestou jej jen ukládat na skládkách. Jednou s recyklovaných surovin, která může být pro výrobu betonu použita, je běžný recyklovaný skelný odpad z obalového skla. Ze skelného recyklátu je dnes vyráběno kamenivo na bázi pěnového skla, které má výborné tepelně izolační vlastnosti, velmi nízkou objemovou hmotnost a můžeme jej používat jako plnivo do betonových směsí. Tento materiál nabízí díky svým vlastnostem možnosti využití v oblastech, kde je obtížné či nemožné použít běžný hutný cementový beton.

2. LEHKÝ BETON

Beton je kompozitním materiálem ve stavebnictví velmi rozšířený. Jeho velkou předností je prostorová variabilita, které umožňuje výrobu stavebních prvků různých tvarů a rozměrů. Pod pojmem beton se skrývá velmi mnoho variant, které jsou zcela odlišné, a to jak z pohledu svých vlastností, tak použití. Kvalitu nám ovlivňuje mnoho faktorů, od způsobu výroby až po způsoby hutnění a ukládání. Velmi důležitým jsou ale suroviny, ze kterých se vyrábí.

Beton jako takový má mechanické vlastnosti velmi dobré, ale tepelně izolační vlastnosti značně zaostávají. Tento problém se dá řešit vhodnou volbou surovin a úpravou složení betonu. Beton se skládá ze tří základních složek: voda, cement a kamenivo. Dá se říci, že pro výrobu lehkých tepelně izolačních betonů jsou způsoby dva. Buď za pomoci provzdušnění cementového tmele (při míchání betonové směsi se přidá provzdušňovací přísada, která vytvoří vzduchové bublinky ve struktuře cementového tmele), nebo druhý způsob, kterým se tato práce zabývá stěžejně, je použití lehkého tepelně izolačního kameniva. Těchto kameniv se v dnešní době vyrábí hned několik druhů, jednotlivá kameniva a jejich vlastnosti si uvedeme později.

V dnešní době se velmi dbá na recyklování surovin a minimalizaci čerpání neobnovitelných zdrojů surovin, tedy znovupoužití surovin pro výrobu nových materiálů, jako jsou například lehká kameniva. Jejich používání je tedy velmi vítané z pohledu ekologie, velmi vítané je také z pohledu energetické náročnosti. Kupříkladu tepelně izolační vlastností běžného betonu, součinitel tepelné vodivosti λ se pohybuje okolo 1,4 W/(mK), kdežto například keramzitbeton se pohybuje okolo 0,5 W/(mK). Nutno říci, že tepelně izolační vlastnosti mohou být hlavním parametrem při volbě nosných obvodových konstrukcí budov. Konstrukce z lehkých betonů budou mít tedy lepší tepelně-izolační vlastnosti, a toto se následně může projevit snížením energetické náročnosti při provozu či užívání stavebního díla.

Návrhem receptur lehkých betonů s různými lehkými plnivy a následným použitím těchto betonů jako vhodným materiálem pro betonování překladů, ztužujících věnců a základových spar, se zabývali Real, Gomes, Rodrigues a Bogas. Tato místa jsou u stavebních celků velmi riziková a jsou nazývány tepelnými mosty budov. Použitím lehkých betonů se tento nedostatek snižuje, díky jejich dobrým tepelně-izolačním vlastnostem. Výzkum se zabýval tepelně izolačními vlastnostmi lehkých betonů, mechanickými vlastnostmi a následně volbu nejvhodnější receptury pro toto užití [25].

Další nespornou výhodou lehkých betonů, jak název prozrazuje, je objemová hmotnost. U běžných hutných betonů se objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu pohybuje v rozmezí 2000 - 2600 kg/m³ v suchém stavu, u lehkých betonů při použití lehkých kameniv objemová hmotnost pod hranicí 1200 kg/m³. Zde bude také patrná úspora při přepravě betonové směsi na stavbu a manipulaci po staveništi.

Použitím lehkého pórovitého kameniva do betonu se také zvýší požární odolnost, a to tímto způsobem, jelikož je v betonu velké množství vody, a to i ve vyzrálém betonu, je zde totiž i voda vázaná chemicky, při působení požáru na betonovou konstrukci má voda tendenci se odpařovat, mění tedy svůj objem, zvětšuje se, následně zaplní všechny volné póry v betonu a po několika minutách začne narušovat strukturu betonu. Poté dochází ke střílení betonu, vystřílení krytí výztuže a následné havárii konstrukce. Toto se děje během několika minut po vypuknutí požáru. Použitím lehkého pórovitého kameniva, se voda může rozpínat do pórové struktury kameniva a oddálí se tak o několik minut odstřelování krytí a moment přímého styku ohně s nosnou výztuží. Je samozřejmé, že při úniku osob z hořící budovy je každá minuta navíc velmi užitečná. Chování betonů při požáru, jak lehkého tak obyčejného, zkoušeli Cheer-Germ Go, Jun-Ren Tang, Jen-HaoChi, Cheng-Tung Chen, Yue-Lin Huang. Zkoušeli požární odolnost stěn z obyčejného betonu a lehkého betonu, kde potvrdili lepší mechanické pevnosti lehké betonové stěny po vystavení ohni, než u stěny z běžného betonu [1].

Pórovité kamenivo může v betonu také plnit další důležitou funkci a to takzvané samoošetřování, samo o sobě je totiž nasáklé a při míchání pórovitého kameniva nasaje určité množství vody. V průběhu tuhnutí, při hydrataci cementu dochází k odpařování vody a někdy, při nedostatečném ošetřování betonu, dochází k nadměrnému odpařování a tedy i ke vzniku trhlin. Pokud však máme nasáklou vodu v pórovitém kamenivu, dojde postupně i k odpaření i této vody a mluvíme tedy o samoošetřování betonu.

Lehký beton má nesporně mnoho výhod, ale nutno říci, že použitím lehkého pórovitého kameniva, poklesnou mechanické vlastnosti betonu a to především pevnosti v tlaku, tahu a moduly pružnosti. Je tedy žádoucí, dosáhnout optimálních tepelně technických vlastností, ale také dostatečně vysokých mechanických pevností. Tuto nelehkou otázku ve své studii řešili Canan Tasdemir, Ozkan Sengul, Mehmet Ali Tasdemir, kde navrhli receptury lehkých betonů s různými lehkými plnivy a následně sledovali objemové hmotnosti, tepelně izolační vlastnosti a pevnosti [2]. Vždy je nutné navrhovat složení lehkých betonů na základě požadovaných vlastností pro konkrétní aplikaci a dle požadavku na výsledný beton přizpůsobit vhodnou volbu surovin a složení betonu

S klesající objemovou hmotností, musíme také počítat se zhoršujícími se parametry týkajícími se akustiky. Tento problém však, ale častěji vidáme na příkladu keramických nebo pórobetonových tvárnic, kde za cílem nejlepší tepelně-izolačních vlastností se jde s objemovou hmotností velmi nízko, prvky jsou až příliš děrované, stěny tvarovek jsou velmi tenké a akustické vlastnosti velmi pokulhávají. Lehké betonové konstrukce, jsou ale jednolité, kompaktní a tato problematika nás zde trápí spíše okrajově.

Lehký beton se tedy od běžného betonu v mnohém liší a lze říci, že se jedná o zcela odlišný stavební materiál. Proto pro lehký beton platí zcela odlišná legislativa. Jak se lehký beton charakterizuje a jaké parametry by měl splňovat, je specifikováno i v normě ČSN EN 206+A1 Beton-specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.

Jedním z nejsledovanějších parametrů jsou mechanické vlastnosti, přesněji pevnosti v tlaku na válcích i na krychlích. Rozdělení zobrazuje tabulka 1. Lehké betony lze dle pevnostních charakteristik rozdělit na konstrukční a výplňové.

Tabulka 1: Pevnostní třídy lehkých betonů [3].

označení třídy	$f_{ck,cyl}$ [N·mm ⁻²]	$f_{ck,cube}$ [N·mm ⁻²]	x_s [N·mm ⁻²]
LC 8/9	8	9	13
LC 12/13	12	13	17
LC 16/18	16	18	22
LC 20/22	20	22	26
LC 25/28	25	28	32
LC 30/33	30	33	37
LC 35/38	35	38	42
LC 40/44	40	44	48
LC 45/50	45	50	54
LC 55/60	55	60	64
LC 60/66	60	66	70
LC 70/77	70	77	81
LC 80/88	80	88	92

$f_{ck,cyl}$ - charakteristická pevnost, stanovená na válcích o průměru 150 a výšce 300 mm

$f_{ck,cube}$ - charakteristická pevnost, stanovená na krychlích s délkou hrany 150 mm

$x_{s- min.}$ - průměrná pevnost tří vzorků, a to krychlí s délkou hrany 150 mm.

Další velmi sledovanou vlastností a jak již z názvu vyplývá, je u lehkých betonů velmi sledovaným parametrem objemová hmotnost, ta se pro tyto betony pohybuje v rozmezí 800 – 2000 kg/m³ v suchém stavu. Dle normy se poté lehké betony dělí do jednotlivých tříd, viz tabulka 2.

Tabulka 2: Třídy objemové hmotnosti hutných lehkých betonů [3].

třída objemové hmotnosti lehkého betonu	hranice objemové hmotnosti betonu ve vysušeném stavu [kg·m ⁻³]
D 1,0	≥ 800 a ≥ 1000
D 1,2	>1000 a ≥1200
D 1,4	>1200 a ≥1400
D 1,6	>1400 a ≥1600
D 1,8	>1600 a ≥1800
D 2,0	>1800 a ≥2000

Poznámka: Přípustná tolerance ±30 kg/m³

Jak již bylo uvedeno, lehký beton můžeme vyrobit více způsoby, dá se říci přímo nebo nepřímo. Tato práce se, ale stěžejně zabývá způsobem nepřímým, tedy použitím lehkého kameniva. Pro lepší orientaci ve způsobech vylehčení lehkých betonů je uvedena tabulka 3, kde je patrné rozdělení z pohledu způsobu a konkrétní možnosti vylehčení betonu.

lehké betony s pórovitým kamenivem nepřímo lehčené					
organické výplně		anorganické kamenivo			
přírodní	umělé	přírodní	umělé		
piliny	pěnový polystyren	vulkan	průmyslové odpady	upravené odpady	umělé kamenivo
pazdeř		tufy	škvára	ztruska	cihloporit
sláma		tufity	popílek	popílek	kavitit
		peremza	cihelná drť	agloporit	keramzit
		diatomity			vermikulit
					perlit
					pěnové sklo

lehké betony pórovité přímo lehčené		
mikropority	makropority	
autoklávované	pěnobetony	plynobetony
	tepelně neošetřené	
	proteptované	
	autoklávované	

Tabulka 3: Rozdělení lehkých betonů dle způsobu vylehčení a použitých materiálů [4].

Lehké betony lze nadále rozdělit dle obsahu pórů ve ztuhnutém betonu, zde jde především o betony hutné a mezerovité. Pro toto rozdělení je určujícím parametrem objem pórů v betonu po ztuhnutí, který je podle různých norem přibližně v rozmezí 3 až 4 %. Do tohoto objemu se započítává objem mezer mezi zrny vzniklých nedokonalým ztuhnutím betonu, nedostatečný obsah malty v betonu, záměrně vysokou mezerovitostí kameniv nebo napěněním maltové složky, pomocí napěňovacích přísad. Velikost těchto pórů je zhruba 0,5 mm a více. Pozor, do tohoto objemu se nezapočítává objem pórů v kamenivu a objem pórů v maltě vzniklých odpařením vody nenavázané na cement. Dále se nezapočítává objem provzdušňovacích přísad pórů definovaných rozměrů, tvaru a rozložení, které jsou záměrně vytvářeny v betonu během míchání pomocí provzdušňovacích přísad za účelem zvýšení odolnosti betonu proti mrazu a rozmrazovacím solím. Velikost těchto provzdušňovacích pórů má být v rozmezí 10-300 mm a množství je dáno 3-7 %. V normách pro navrhování a provádění konstrukcí z lehkých betonů jsou rozdílné zásady pro konstrukce z hutného lehkého betonu a mezerovitého lehkého betonu, hlavně z hlediska použití pro vyztužené konstrukce. Lehké mezerovité betony vyrábíme jak z přírodního hutného kameniva, tak i z pórovitého kameniva. Granulometrické složení má přetržitou křivku zrnitosti, nejčastěji volíme jednu frakci kameniva. Cementová malta spojuje zrna jen částečně a takto vzniklé mezery zvyšují tepelný odpor. Betony dosahují pevnosti 6 až 8 MPa a objemové hmotnosti 1500 až 1600 kg/m³, odolnost proti mrazu je velmi dobrá a smrštění je velmi malé. Nevýhodou je náročnější výroba. Můžeme tedy říci, že se u mezerovitých betonů záměrně snažíme, aby prostor mezi zrny zůstal nevyplněn, mezi zrny zůstane pouze vzduch a tím dojde k vylehčení. Hutné lehké

betony se používají obdobně jako obyčejný beton. Navrhují se podle stejných pravidel, pouze s odchylkami zohledňujícími například rozdílné deformační vlastnosti lehkých betonů. Lehké betony lze rozdělit i dle rozhodující funkce, pro kterou jsou navrhovány a následně užívány. Dělení je na konstrukční lehké betony, které plní funkci nosnou a hlavním požadavkem je pevnost při využívání nízké objemové hmotnosti. Dalšími jsou lehké betony konstrukčně izolační, kde se využívá funkce nosné i tepelně izolační. Posledními jsou čistě tepelně izolační, kde využíváme zcela jejich tepelně izolační schopnost. Z lehkého betonu se stejně jako z obyčejného betonu dají vyrábět monolitické konstrukce pozemní i inženýrských staveb, tak také dílce prefabrikované [5].

3. LEHKÉ KAMENIVO

Jak již bylo zmíněno, tato práce se zabývá především nepřímým způsobem vylehčení, tedy používáním lehkého, pórovitého, tepelně izolačního kameniva neboli plniva. Nejprve si uvědomit základní požadavky na tyto typy kameniv, které jsou řešeny legislativně a jsou zakotveny v normě ČSN EN 13055-1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty. Tato norma určuje vlastnosti pórovitého kameniva a pórovitého fileru jako kameniva, získaného úpravou přírodních, umělých nebo recyklovaných materiálů a směsi těchto kameniv pro použití v betonu, maltě či injektážní maltě v pozemních stavbách, silnicích a inženýrských stavbách. Tato evropská norma zahrnuje pórovité kamenivo anorganického původu, které má objemovou hmotnost zrn ne větší než 2000 kg/m^3 ($2,0 \text{ Mg/m}^3$) nebo sypnou objemovou hmotnost ne větší než 1200 kg/m^3 ($1,2 \text{ Mg/m}^3$) zahrnující:

- přírodní kamenivo,
- kamenivo vyrobené z přírodních materiálů, nebo z vedlejšího produktu při průmyslovém procesu,
- vedlejšího produktu při průmyslovém procesu,
- recyklované kamenivo.

Jsou zde také uvedeny požadavky na fyzikální vlastnosti:

- použití a původ kameniva,
- objemová hmotnost (sypná objemová hmotnost, objemová hmotnost zrn),
- frakce kameniva (množství nadsítného a podsítného zbytku, zrnitost, tvar zrn, jemné částice, zrnitost filerů, nasákavost, vlhkost, odolnost proti drcení, procentní podíl drcených zrn odolnost proti rozpadu, odolnost proti zmrazování a rozmrazování).

Požadavky na chemické vlastnosti

- obsah chloridů, síranů,
- ztráta žíháním u popílků,
- organické znečištění,
- alkalicko-křemičitá reakce[6].

V dnešní době si v podstatě můžeme mezi lehkými, pórovitými kamenivy vybírat na základě požadovaných vlastností výsledného betonu. Lehkých kameniv je vyráběno několik

druhů, dále jsou zmiňována ta kameniva, která jsou vhodná jako plnivo do betonu a jsou běžně dostupná na trhu. Detailněji jsou jednotlivá vybraná pórovitá kameniva popsána dále.

3.1 Kamenivo na bázi expandovaných hlín

Kamenivo z expandovaných jííl jsou označována jako keramzit. Jsou to téměř kulovitá zrna různých velikostí, jsou lehká a pevná, chemicky stálá a ekologická. Surovinou jsou tedy snadno tavitelné jíly (cypřišové jílovce), které jsou vhodné pro nadýmání, takovéto hlíny musí splňovat tři podmínky. První podmínkou je, že se v hlíně při vhodném žáru musí uvolnit dostatek látky, aby se póry na povrchu dostatečně zaplnily taveninou, která dále znemožňuje unikání uvnitř tvořících se plynů. Toto nám zaručí dostatečné množství taviv. Zadruhé je nutné, aby uvnitř materiálu byla dostatečně vysoká viskozita taveniny, aby propouštění plynu zůstalo omezeno, zjednodušeně aby nedocházelo ke spojování bublin plynu a vytváření velkých pórů. Jedná se o stav pyroplastický. Třetí podmínkou je přítomnost směsi látek, které umí uvolnit plyny, právě když se dosáhne pyroplastického stavu. Důležité je, aby byla zemina velmi plastická a jemnozrná. Surovina musí být před pálením dobře propracována a byla stejnorodá. Plastické těsto s přísadou uhelnatých látek zpracuje na cihlářské soupravě. Poté se surovina protlačí přes děrované ústí cihlářského lisu a vytvoří se válečky, nařezané drátěnými rotačními odřezávači. Válečky se dále zaprašují suchou, žáruvzdornější zeminou, kupříkladu šamotem, aby se neslepovaly. Kulového tvaru se poté částečně dosáhne v rotačním bubnu a dodatečně při samotném výpalu v krátké rotační peci, kde se teplota pohybuje mezi 1100°C a 1250 °C. Výpal probíhá vcelku krátce v redukčním prostředí, který je důležitý pro tvorbu plynů. Redukční prostředí má za příčinu červenohnědý povrch a šedý vnitřek. Dále následuje pozvolné a dlouhé chlazení, proto aby se odstranilo vnitřní pnutí a zvýšila pevnost. Chladí se v rotačním bubnu nebo na roštu. Poté následuje třídění a následně expedice [4]. Dělení frakcí je následující 0-2, 2-4, 4-8 a 8-16 mm. V České republice je keramzit prodáván pod obchodní značkou Liapor, a vyrábí se v závodě Lias Vintířov [15].

Jedna ze zahraničních studií porovnává dva typy betonů, v jednom je používáno jako plnivo pevný odpad z výroby palmového oleje, druhý využívá jako plnivo právě expandované jíly. Porovnávají betony v čerstvém stavu a také vlastnosti již ztvrdlých betonů. Zajímavostí je, že beton vyrobený z odpadu palmového oleje převyšoval beton z expandovaných jííl ve všech směrech. Zajímavé také bylo, že beton z expandovaných jííl měl po 7 dnech téměř stejné

pevnosti v tlaku jako po 28 dnech, pevnosti tohoto betonu se tedy s dobou zrání již nezvyšovaly [21].



Obrázek 1: Keramické kamenivo Liapor

Tabulka 4: Vlastnosti keramického kameniva Liapor [15].

Vlastnosti pórovitého kameniva Liapor					
	jednotka	0-2/575	2-4/450	4-8/450	8-16/275
tvár zrn		oválná až kulovitá, uzavřená zrna			
sypaná hmotnost	[kg·m ⁻³]	575	450	450	275
objemová hmotnost zrna	[kg·m ⁻³]	1050	850	850	575
nasákavost W ₆₀	[% hm.,max]	4	5	5	7
odolnost proti drcení min	[MPa]	4	2,1	1,7	0,6
odolnost ASR dle ČSN 721179		dilatometrická zkouška, rozpínání po 3 měsících < 0,05 %, po 6 měsících < 0,1 %			
chemické složení		SiO ₂ 55, Al ₂ O ₃ 24, Fe ₂ O ₃ 14, CaO 5, stopové prvky 2			
souč. tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,12	0,11	0,11	0,09
třída hořlavosti		A1 (DIN 4102)			

3.2 Kamenivo na bázi popílku

Toto kamenivo jak již název napovídá, je vyráběno z elektrárenského popílku a je označováno jako agloporit. Je to umělé pórovité kamenivo, získané sbalkováním létavých popílků, vznikajících při spalování černých a hnědých uhlí a spékáním sbalků na aglomeračním roštu. Základní surovinou je tedy odpad vznikající v energetickém, hutnickém i jiném průmyslu.

Jelikož je popílek velmi jemný materiál, není třeba jej drtit ani mlet, před sbalkováním se k němu přidává většinou jen voda o obsahu 20 až 30 %. Voda napomáhá surovině ke granulaci, ale také k udržení stejnoměrné prodyšnosti a k nepřímé regulaci potřeby spalitelných látek v surovině, to vše je důležité pro stejnoměrné propalování a zvětšování pórovitosti agloporitu. Abychom ze směsi popílku a vody získali sbalky, používají se buď granulační bubny, ale častěji sbalkovací talíře. Předvlhčená surovina se na talíři ještě kropí jemnými kapičkami vody. Skrápěné popílkové kuličky se na talíři valí, a tak se dosahuje kulovitého tvaru. Velikost kuliček se dá regulovat sklonem talíře a také rychlostí otáčení. Vytvořené sbalky je pak nutné rychle vysušit a vypálit. Sušit se musí samozřejmě tak aby je unikající vodní pára neporušila. Dávkovačem se sází sbalky na rošty ve výšce násypu cca 20 cm. Výpal se provádí nejčastěji na různých typech aglomeračních roštů, cca 20 m dlouhých, na nichž se sbalky zapálí nad zapalovací hlavou (cca 1300 °C), dále prohořívají a spékají se. Důležité jsou i odsávací komory podél celého roštu, tvořící regulovaný podtlak, tím se zajišťuje dostatečný přívod vzduchu. Na konci pásu, u předposlední odsávací komory, dosáhne max. teplota 1100-1250 °C. Zde končí slinovací proces. Poslední odsávací komora už se používá k chlazení. Poté se již vzniklý agloporit třídí dle frakcí a malé zbytky se vracejí zpět do výroby [4].

O využití popílku a následné výrobě popílkových sbalků, optimálního složení a následné výrobě a vlastnostech a chování lehkého betonu vyrobeného z tohoto pórovitého kameniva, píše Nadesan M. S., Dinakar P. [7].

Tabulka 5: Vlastnosti lehkého pórovitého kameniva Agloporit [16].

Vlastnosti pórovitého kameniva Agloporit			
	jednotka	4-8 mm	8-16 mm
sypná hmotnost volná	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	590-680	590-680
sypná hmotnost setřesená	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	630-730	660-760
objemová hmotnost	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	1200-1250	1150-1250
nasákavost W	$[\%]$	28-30	28-32
pevnost	$[\text{MPa}]$	5,6	5,9



Obrázek 2: 1. Vstupní surovina pro agloporit, velmi jemný popílek,
2. Frakce agloporitu 8-16 mm,
3. Agloporit v řezu [16].

3.3 Kameniva na bázi pěnových skel

Pěnové sklo se vyrábí z odpadního obalového skla. Surovina se nadrtí, namele, následně se přidají expanzní přísady, směs se homogenizuje a následně pálí v peci. Z pece poté vyjíždí tuhý materiál s velmi pórovitou strukturou, tedy s nízkou objemovou hmotností a dobrými tepelně izolačními vlastnostmi. Takto lze jen velmi stručně charakterizovat pěnové sklo. Vstupním surovinám, předúpravě surovin, výrobním procesem, vlastnostem a užitím se podrobněji budeme věnovat v kapitole 5. Pěnové sklo. Výsledné produkty se liší v závislosti na výrobním procesu, lze je ale rozdělit na dva druhy. Jedním jsou kameniva svým tvarem podobná drcenému kamenivu, zrna jsou nepravidelná s hranami, budeme je nazývat jako

drcené kamenivo z pěnového skla. Druhým kamenivem z pěnového skla jsou zrna kulovitého či vejčitého tvaru, říkáme mu oválné kamenivo z pěnového skla. Rozdíl můžeme vidět na obrázku 3.



Obrázek 3: Kameniva z pěnového skla, vlevo drcené, vpravo oválné[11,13].

4. PĚNOVÉ SKLO

Pěnové sklo je tuhý izolační materiál vyrobený z expandovaného skla s velmi pórovitou strukturou. Můžeme jej definovat jako heterogenní soustavu plynné a tuhé fáze, plynná fáze zaujímá cca 90 % z celkového objemu. Jedná se o ztuhlou pěnu s uzavřenými buňkami. Buňky pěnového skla jsou velmi pravidelné z pohledu na jejich velikost a rozdělení. Toto rozdělení vytváří skvělé vlastnosti, především vysokou mechanickou pevnost a nízkou nasákavost vzhledem k zachování malé objemové hmotnosti. Pěnové sklo je také odolné vůči hnilobě, mikroorganismům, hlodavcům a hmyzu [8].

Počátek výroby pěnového skla se datuje od 40. let 20. století. V České republice se začalo pěnové sklo vyrábět v 50. letech 20. století (1958 Spumavit – Řemenice u Teplic výroba však byla později zastavena) [9].

4.1 Vstupní suroviny a výroba

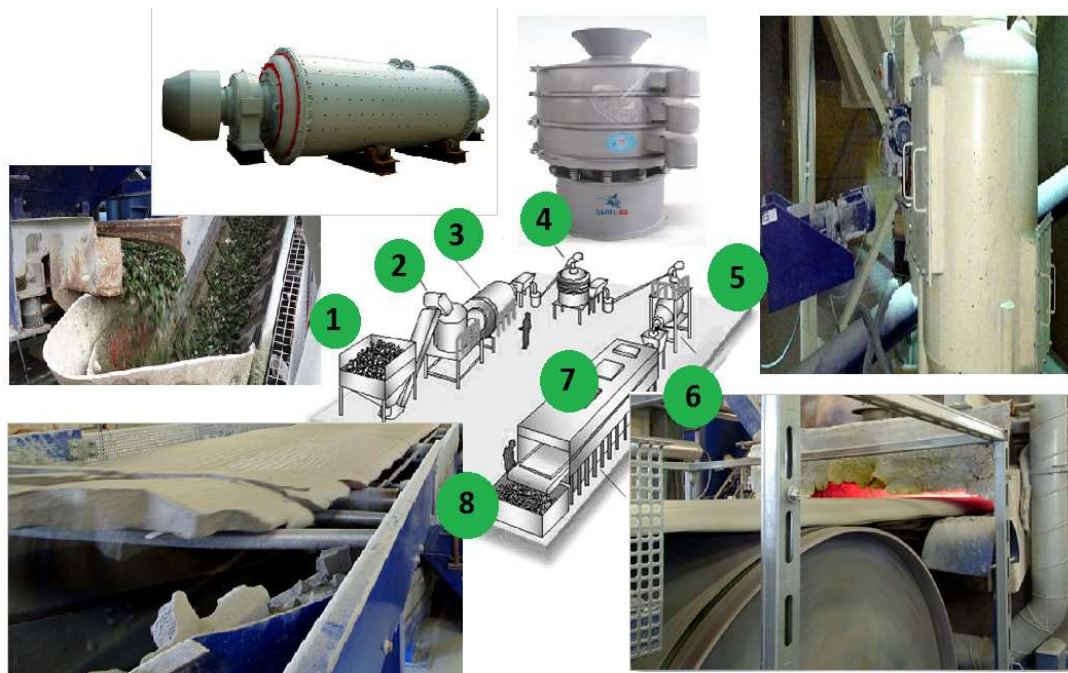
Pro pěnové sklo je základní surovinou skelná moučka, která se nejčastěji vyrábí z aluminio-silikátového skla. Takovéto sklo najdeme v každodenním životě naprosto běžně a to v zelených kontejnerech pro tříděný odpad. Pro výrobu se upotřebí střepy všech velikostí i ty, které nelze použít ve sklářském průmyslu pro výrobu nového obalového skla. Skleněné střepy se nadále upravují mletím, na velmi jemný prášek, nazývaný skelná moučka, ta musí být velmi najemno namletá. Další výroba je u jednotlivých pěnových skel různá a bude u konkrétních výrobků popsána samostatně, principiálně však skelná moučka dále putuje do pece, kde dochází k tavení a současně k oxidaci částic uhlíku na CO_2 , které tvoří v tavenině bublinky, mající za následek několikanásobné zvětšení původního objemu. Z tohoto důvodu mají tyto materiály tak nízkou objemovou hmotnost, a tak dobré tepelně izolační vlastnosti [8].



Obrázek 4: Namletá skelná moučka požadované granulometrie [10].

4.2 Drcené kamenivo z pěnového skla

Pro tento druh pěnového skla je základní surovinou skelná moučka, jak již bylo uvedeno dříve. Požadavky na skelnou moučku jsou následující, granulometrie 90 mikronů, obsah nežádoucích organických nečistot do 1 %, vlhkost se pohybuje do 1 %. Má vždy bílou barvu nezávisle na barevnosti skleněného střepu, ze kterého je mleta. Má předepsané i chemické složení, které obsahuje 71 % SiO_2 , 1,7-2 % Al_2O_3 , 9-11 % CaO , 0,5-1,5 % MgO , 14-15 % Na_2CO_3 a 0,5 % K_2O . Ke skelné moučce se pak v homogenizátoru přidávají přísady, které fungující jako kypřidla, podporující expanzní proces. Jednotliví výrobci používají k expanzi různé varianty, které však nejsou zveřejňovány z důvodu ochrany rozdílnosti výroby. Tato směs se rozprostře na rounu a putuje do tunelové pece, kde se teplota pohybuje okolo 1000 °C a je dlouhá 10-15 m. V peci dochází k tavení skleněného prášku a současně k oxidaci částic uhlíku na CO_2 , to tvoří v tavenině drobné bublinky, které mají za následek až dvacetinásobné zvětšení původního objemu. Po tomto procesu je blok vycházející z tunelové pece ochlazován z 1000 °C na teplotu venkovního okolí (cca 20 °C). Teplotní skok má za následek samovolné rozpraskání bloku, to však ničemu nevádí, jelikož se materiál dále upravuje drcením na požadované frakce [8].



1. Skleněné střepy na vstupu
2. Drtič, předdrcení skleněného střepu
3. Mletí, kulový mlýn
4. Síta, k odstranění nečistot
5. Homogenizér, mísení skelné moučky s aktivátorem
6. Skelná moučka na vstupu do pece
7. Tunelová pec
8. Pěnové sklo po výstupu z pece

Obrázek 5: Schéma výroby drceného pěnového skla [10].

V České republice je využíván tento výrobní postup při výrobě pěnového skla. Rozpraskaný vypálený a ochlazený blok se poté nejčastěji upravuje dalším drcením na frakce 0-4, 4-16, 16-32 a 0-64 mm. Není však problém upravit granulometrii dle požadavků, a to jak na úzké frakce, tak i na široké frakce kameniva. Vlastnosti vyráběných kameniv jsou uvedeny v tabulce 6[11].

Tabulka 6: Vlastnosti lehkého pórovitého kameniva z pěnového skla Refaglass [11].

vlastnosti		specifikace			
		frakce [mm]			
		0-4 mm	4-16 mm	16-32 mm	0-63 mm
barva		Šedá	Šedá	Šedá	Šedá
hmotnost volně sypaného kameniva	[kg·m ⁻³]	320	150-170	150-170	150-170
součinitel tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,096	0,086	0,085	0,077
odolnost proti drcení	[N·mm ⁻²]	1,07	0,086	1,24	0,73
odolnost proti zmrazování a rozmrazování		Ano	Ano	Ano	Ano
vzlínavost násypu tl.30 cm	[mm]	212	97	50	32,5
celková nasákavost zrn	[%]	46,7	25,2	18,7	5,7
požární odolnost		A1	A1	A1	A1

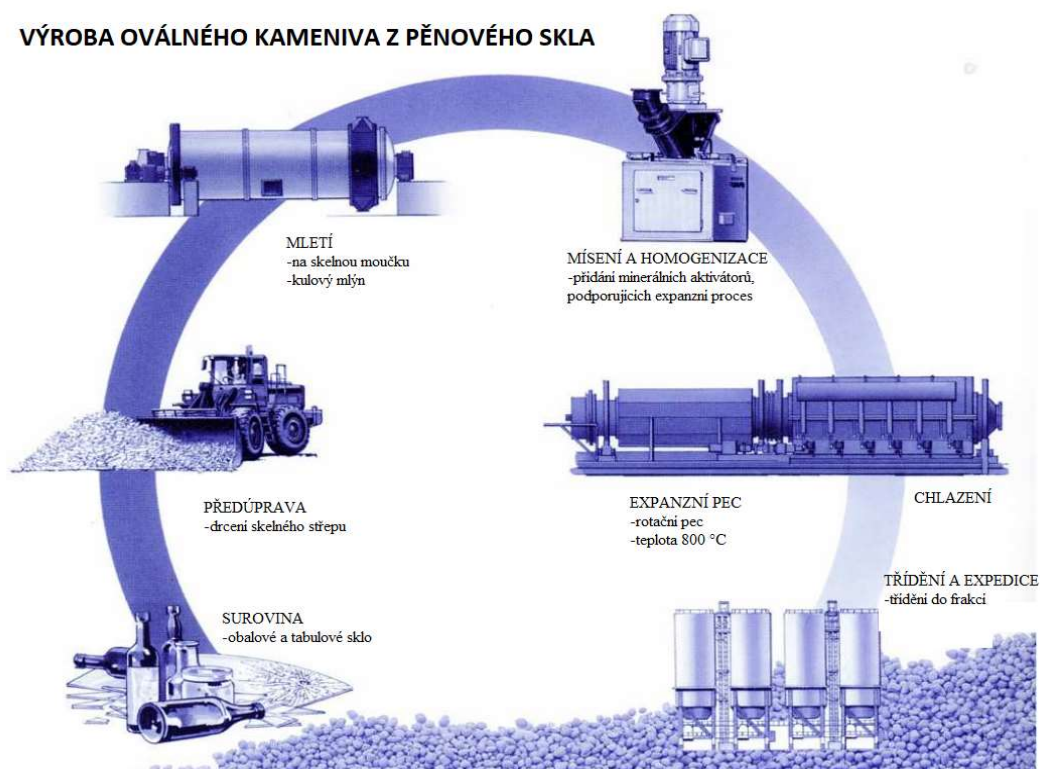
Bai, Yang, XU, Jing zkusili připravit pěnové sklo z odpadního skla s přidavkem popílku, jako výchozích surovin. Jako pěnivé činidlo použili komerčně dostupné prášky SiC. Podařilo se jim vyrobit pěnové sklo s objemovou hmotností 270 kg/m³ a pevností v tlaku 1,0 MPa. Nutno říci, že výsledný produkt byl velmi podobný pěnovému sklu tohoto typu a jako jeho velkou přidanou hodnotu lze považovat použití další odpadní suroviny, a to popílku [24].

Z pěnového skla se vyrábí i deskové izolanty Ty se však vyrábí trochu odlišným způsobem. V tomto případě se skelná moučka společně s aktivátory po homogenizování plní do forem a následně ve formě prochází pálicím procesem. Za pozvolného chlazení, aby nedocházelo k rozpraskání, se poté nařezou na požadované formáty. Desky se dají použít jako tepelná izolace do podlah, základových desek, fasád, nebo vnitřní izolace stěn, díky jejich mechanickým vlastnostem se z nich dnes již vyrábějí spádové klíny do plochých střech i střech pojížděných. Nejběžnější použití je však pouze v oblasti soklů nad a pod terénem, kde

se upotřebí výborná tepelná izolačnost a dobrá mechanická odolnost. Použití těchto desek, jako celoplošného zateplení, se stěží rozbíhá, cenově se totiž nevyrovnávají dosud používaným izolantům. Rozměry, tloušťky, objemová hmotnost, součinitelé tepelných vodivostí, pevnosti v tlaku ohybu a tahu, těchto desek, se poté liší dle toho, do které části stavby a pro jaký účel je deska z pěnového skla určena [11].

4.3 Oválné kamenivo z pěnového skla

Oválné kamenivo z pěnového skla je tvarově i barevně odlišné od pěnového skla popisovaného výše. Výrobní proces tohoto pěnového skla se také trochu odlišuje. Jedná se o pěnové sklo mající tvar kuliček s bílou až krémovou barvou, má uzavřenou pórovou strukturu, výrobní způsob tohoto pěnového skla se vyvíjí dnes již téměř 30 let. Základní surovinou je skelný odpad z obalového nebo tabulového skla. Skelný recyklát se podrtí a pomele na požadovanou velikost, na skelnou moučku. Dále se k ní přidají minerální aktivátory, fungující jako kypřidla, podporující expanzní proces. Již přichystaná surovina s požadovanými vlastnostmi a složením se poté pálí v rotační peci při teplotě cca 800 °C. Dále dochází k chlazení a následně třídění do frakcí.



Obrázek 6: Schéma výroby oválného kameniva z pěnového skla [14].

Jednotlivé frakce se poté používají dle jejich velikostí pro různé druhy produktů. Používají se jako plniva do malt, správkových malt, omítek, sanačních omítek, různé vyrovnávací výplně, dále jako plniva panelů a desek, vyrábějí se z nich deskové tepelné izolace a slouží také jako plnivo do lehkých betonů [13]. Komerčně dostupná jsou na trhu kameniva od společností Poraver a Liaver. Obě kameniva se mohou od sebe lišit, každá firma má své „know-how“, jsou si však velice podobná. Pro srovnání slouží tabulka 7.

Tabulka 7: Tabulka vlastností kameniv Poraver a Liaver [13,14].

		Vlastnosti kameniva Liaver						Vlastnosti kameniva Poraver				
	jednotka	0,1-0,3 mm	0,25-0,5 mm	0,5-1 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	0,1-0,3 mm	0,25-0,5 mm	0,5-1 mm	1-2 mm	2-4 mm
tvár zrn		oválná, uzavřená zrna						oválná, uzavřená zrna, bílá až krémovitá				
sytná hmotnost	[kg·m ⁻³]	450	300	250	220	190	170	400	340	270	230	190
objemová hmotnost zrna	[kg·m ⁻³]	800	540	450	350	310	300	950	700	500	400	320
odolnost proti drcení min	[MPa]	> 3,5	> 2,9	> 2,6	> 2,4	> 2,4	> 1,9	2,8	2,6	2	1,6	1,4
souč. tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	není změřeno				0,07	0,07	není změřeno				0,07

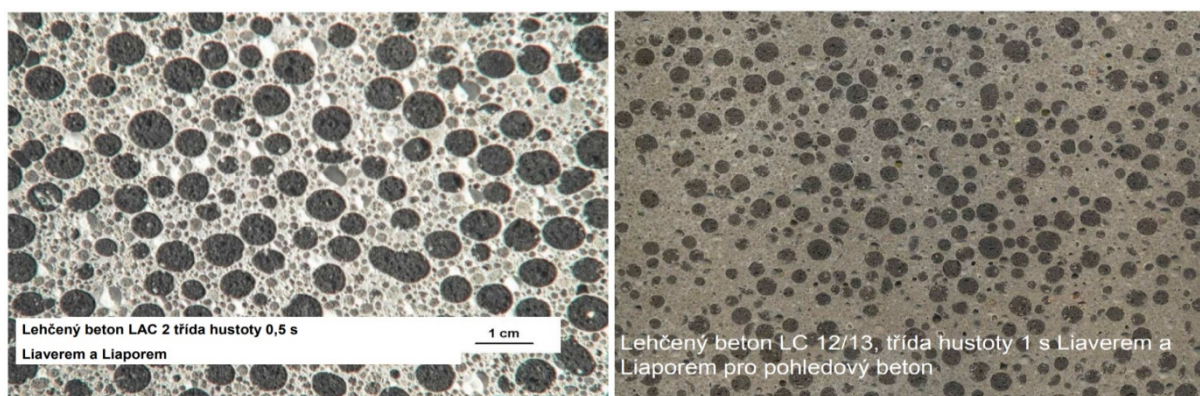


Obrázek 7: Detailní pohled na strukturu oválného kameniva z pěnového skla [13].

Oválné kamenivo z pěnového skla se dále používá buď jako plnivo do lehkých malt, omítek a betonů, nebo slouží jako surovina pro výrobu desek (protipožárních, zvukově a tepelně izolačních), z kameniva se také dnes již vyrábí zdící tvárnice, dají se použít pro stavby z hlíny, kde se pojí lehkým jílem, nebo se používají jako vyrovnávací vrstvy, ať už spojené či nepojené [14]. Společnost Poraver nabízí dva produkty, jsou to Poraver a Poraver X. Kamenivo je porézní i na povrchu, je tedy savé. Naopak kamenivo Poraver X je na povrchu slinuté, má tedy menší nasákavost a vyšší pevnost. Jako příklad lehkých tepelně izolačních betonů s oválným kamenivem lze uvést dva druhy betonů včetně jejich parametrů. Více tabulka č. 8 a struktura na obrázku č. 8.

Tabulka 8: Vlastnosti lehkého a izolačního betonu z pěnového skla Liaver [14].

lehký beton / izolační beton			
	hustota v suchém stavu	pevnost	tepelná vodivost
	[kg·m ⁻³]	[MPa]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
LAC 2 (dle DIN EN 1520)	400 - 500	> 1,5	0,12
LC 12/13 (dle DIN 1045 / DIN EN 206-1)	950	8 9	0,32



Obrázek 8: Struktura betonu LAC 2 a LC 12/13 [14].

Pánové Yu, Spiesz a Brouwers pracovali na studii, která se zabývala navrhováním receptur lehkých betonů, kde jako plnivo sloužilo právě oválné kamenivo z pěnového skla, komerčně vyráběné v Německu. V experimentu bylo navrženo různé složení receptur a dále sledovali vliv složení na mechanické vlastnosti, zpracovatelnost, tepelně izolační vlastnosti i mnoho dalších parametrů. Výsledné pevnosti lehkých betonů převyšovaly 10 MPa a tepelná vodivost byla okolo 0,12 W/(mK). Prokázali také odolnost vůči vzniku alkalicko-křemičité reakci [22].

5. PROBLEMATIKA VÝROBY LEHKÝCH BETONŮ

Lehké betony lze vyrábět ve stejných výrobních zařízeních, jako se používají pro výrobu obyčejných betonů. Lehké betony lze vyrábět i jako betony samozhutnitelné, nutno však počítat s nižší objemovou hmotností zrn lehčeného kameniva, tedy s menší gravitační přitažlivostí a podstatně náročnějším hutněním. Pro zlepšení lze však použít běžné přísady do betonu. Rovněž je nutné počítat s odlišnými vlastnostmi lehkých kameniv oproti obyčejným kamenivům. Nutno si uvědomit větší vliv vlhkosti na sypnou a objemovou hmotnost zrn lehkých pórovitých kameniv, možnost větší vnitřní vlhkosti kameniva, vyšší nasákavost, větší drtitelnost lehkých pórovitých kameniv při míchání, dále je také potřeba počítat s větší závislostí pevnosti betonu na pevnosti kameniva. Také různé frakce lehkého kameniva mají různou objemovou hmotnost a objemová hmotnost zrn lehkého kameniva je většinou menší než objemová hmotnost vody, což může způsobit různé potíže, které u běžných betonů nenastávají. Při hmotnostním dávkování je nutno myslet, že hmotnostní vlhkost u lehkých pórovitých kameniv je podstatně větší než u kameniv hutných, je tedy nutná korekce. Objemové dávkování může zajistit rovnoměrnější dávky. Při používání otevřených boxů pro skladování kameniva může být objemové dávkování vhodnější. Cílem totiž je, aby byla dávkována správná objemová dávka a ne hmotnostní dávka. Při objemovém dávkování je vliv nerovnoměrností vlhkosti a objemové hmotnosti podstatně menší a skutečný objem zrn lehkého kameniva v záměsi je téměř konstantní (za předpokladu, že je konstantní mezerovitost kameniva). Při objemovém dávkování není korekce podle okamžité vlhkosti nutná. V případě transportbetonu je nutno množství přídavné vody zvýšit ještě o vodu, která se vsákne do kameniva během dopravy. V případě dopravy transportbetonu do větší vzdálenosti je možno brát pro stanovení množství přídavné vody nasákavost lehkého kameniva po 120 minutách. Nasákavost lehkého kameniva pod tlakem, například uvnitř potrubí při čerpaní, je možné omezit předvlhčením kameniva. Předvlhčení lze provést postřikem na skládce nebo zkrápěním na páse během dopravy do sil. Vodu, která se použije na předvlhčení kameniva, a která se ještě před vstupem do míchačky vsákne do kameniva tak, že neulpívá na povrchu, jako povrchová voda, můžeme nazývat předmáčecí vodou. Tato voda se rovněž nezahrnuje do výpočtu vodního součinitele ani se s ní nepracuje při návrhu záměsi. Je však nutno stanovit, jaká je vnitřní vlhkost a nasákavost lehkého kameniva po tomto předmáčení a s těmito hodnotami pak pracovat při návrhu záměsi. Dále je také potřeba počítat s drtitelností zrn, hlavně u větších frakcí [5].

Popsána byla některá rizika a odlišnosti související s návrhem či výrobou lehkých betonů z lehkého kameniva. Dalším rizikem, které je často řešeno v případě lehkých kameniv na bázi skla, je tzv. alkalicko-křemičitá reakce. Tento jev je hrozbou u ztvrdlých betonů a projevuje se až v delším čase, kdy už je beton ztvrdlý.

6. ALKALICKO-KŘEMIČITÁ REAKCE (ASR)

V první řadě je na místě si uvést, proč je zde tato problematika řešena. Jak bude později popsáno podrobněji, pro vznik alkalicko-křemičité reakce je nutná přítomnost určitých složek, jednou ze složek je přítomnost SiO_2 . Uváděli jsme si složení skelné moučky, ze které se kamenivo Refaglass vyrábí (Refaglass bude používáno v praktické části této práce). Právě vysoký obsah SiO_2 (ve vstupní surovině zastoupen 71 %), je tedy informace, proč je na místě se problematikou ASR v této souvislosti zabývat.

6.1 Úvod, historie a charakteristika ASR

Alkalicko-křemičitá reakce (ASR) je v dnešní době významným problémem u betonových konstrukcí. Poškození betonu alkalicko-křemičitou reakcí je stále aktuální problém, kterým se zabývají vědci již od roku 1940. Metody a výzkum se stále vyvíjí a je více vědeckých poznatků o vzniku poškození díky alkalicko-křemičité reakci, ale ani nyní nejsou známy všechny aspekty. Již v roce 1940 byly prováděny výzkumy problematiky ASR v USA, Austrálii a Dánsku, přičemž se potvrdil vztah mezi složením cementu, typem kameniva a poměrem mísení betonové směsi a rozpínáním. Jako první se důsledek reakce kameniva s alkáliemi v betonu objevil v USA v Kalifornii, byl okolo 30. a 40. let 20. století, kde Stanton v betonovém krytu dálnice objevil trhliny. Stanton zjistil, že rozpínání a vznik trhlin je výsledkem působení cementu s vysokým obsahem alkálií na kamenivo ve zkušebních maltových trámečcích uložených v prostředí s velmi vysokou vlhkostí. Z výsledků experimentů vyvodil dva závěry. Zaprvé, rozpínání vznikající v důsledku ASR v maltových trámečcích je zanedbatelné, když obsah alkálií v cementu je nižší než 0,6 % (obsah alkálií je vyjádřen jako ekvivalentní Na_2O , tj. $\% \text{Na}_2\text{O}_e = \% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \% \text{K}_2\text{O}$). Zadruhé, částečná náhrada vysokoalkalického cementu vhodným pucolánem zabraňuje rozpínání. Alkalické rozpínání kameniva v betonu je poruchou vyskytující se také v ČR. Konstrukce takto potrhane vnitřním rozpínáním téměř nelze opravit. V ČR se této problematice začala věnovat větší pozornost až v roce 1998. Tato porucha se projevila ve velké míře na části

cementobetonového krytu dálnice D11. Vizualně však tento jev lze pozorovat v ČR i na jiných typech konstrukcí [17,18,19].

6.2 Základní složky pro vznik ASR

Trhliny v betonu a jeho narušení způsobuje kromě ASR samozřejmě spousta dalších okolních vlivů, abychom jsme však mohli uvažovat o narušení betonu v rámci působení ASR, musí být přítomny základní reakční komponenty. Nutno říct, že pokud nebudou přítomny všechny základní složky pro vznik ASR, nemůže tato reakce nikdy nastat. Alkalickou reakcí betonu je celý komplex složitých fyzikálně chemických reakcí mezi roztoky v betonu a částicemi reaktivního SiO_2 v kamenných součástech. K této reakci dochází především u cementů velmi bohatých na oxidy alkálií Na_2O ekvivalentní ($0,658 \text{ K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$), jsou to tzv. vysokoalkalické cementy. Obsah alkálií v cementu je velmi proměnlivý a je závislý na minerálním složení výchozích surovin, slínku, přísad a na technologickém procesu výroby. Dle obsahu Na_2O ekvivalentu dělíme cementy na:

- nízkoalkalické $< 0,60 \text{ \% Na}_2\text{O ekv.}$,
- středněalkalické $0,60 - 0,90 \text{ \% Na}_2\text{O ekv.}$,
- vysokoalkalické $> 0,90 \text{ \% Na}_2\text{O ekv.}$

Dalším faktorem pro vznik ASR je voda, dostatečné množství vlhkosti je nezbytné pro vznik a účinky ASR. Při poklesu vnitřní vlhkosti pod 80 % reakce ustává. Pokud v prostředí v okolí betonu je dostatek vlhkosti, pokračuje reakce do té doby, až jsou reaktivní složky zcela zreagovány [7,18].

Další nezbytnou složkou pro vznik ASR je přítomnost reaktivní formy SiO_2 . Reaktivní oxid křemičitý, obsažený v některých typech kameniv reaguje s alkáliemi z cementu. Problematické jsou především tyto formy SiO_2 :

- opál, jeví se jako pravděpodobně nejreaktivnější minerál nacházející se v přírodě
- chalcedon, vykazuje reaktivitu s alkáliemi
- křemen, hrubě krystalická forma oxidu křemičitého je obvykle nereaktivní, velmi poruchový křemen bývá přítomen v kvarcitech a rulách a dále deformovaný křemen vykazuje rovněž reaktivitu s alkáliemi
- cristobalit, se řadí k reaktivním minerálům, proto se doporučuje věnování pozornosti tohoto minerálu ve struskách, které mají být použity jako kamenivo do betonu,

- vulkanická skla, v důsledku neuspořádané vnitřní struktury je lze považovat za reaktivní, kyselá skla (obsahují více než 66 % SiO_2), skla středně kyselá (obsahují 52 až 65 % SiO_2) jsou reaktivní, jejich reaktivita klesá se snižujícím se obsahem SiO_2 ,
- vulkanické horniny, kyselé a střední vulkanické horniny, které vykazují alkalickou reaktivitu, jsou např. některé ryolity, dacity, latity a andesity, čediče obsahující skla s vysokým obsahem SiO_2 reagují s alkáliemi pomalu a způsobují v betonu rozpínání a vznik sítí trhlin typických pro ASR,
- jílové břidlice, meta-droby, fylity a břidlice, metamorfované sedimentární horniny, které mohou reagovat s alkáliemi v cementu a způsobit rozpínání a vznik trhlin [17].

Tabulka 9: Rozdělení hornin dle reaktivnosti kameniva s alkáliemi [17]

reaktivnost	skupina hornin		petrografický druh
nízká	magmatické		granit, granodiorit, gabbro, čedič, melafyr, diabas, spilit, znělec
	sedimentární	zpevněné	vápenec bez přítomnosti rohovců
		nezpevněné	čistý křemitý písek (z druhohorních pískovců)
	metamorfované		granulit, amfibolit, hadec, krystalický vápenec
střední	magmatické		ryolit, porfyr, porfyrit, melafyr s mandlovci
	sedimentární	zpevněné	droba, slepencové droby
		nezpevněné	písek, štěrkopísek,
	metamorfované		pararula, ortorula, rohovec, metamorfované, prachovce, prachovcové břidlice
vysoká	magmatické		ryolit, porfyr, porfyrit, vulkanické sklo, sopečný tuf, andezit
	sedimentární	zpevněné	droba, vápenec s rohovcem organického původu, křemenec, dolomit (u dolomitu se jedná o alkalicko-karbonátovou reakci)
		nezpevněné	písek, štěrkopísek
	metamorfované		rohovec, metadroba, bulitník, kvarcit, deformované křemenné agregáty, pararula, ortorula

Posledním činitelem podporující reakci je teplota, dosud se neví, v jak velké míře urychluje teplota ASR, ale je jasné, že se vzrůstající teplotou se rychlost reakce zvyšuje. Nejnáchylnější části betonové konstrukce jsou ty, které jsou vystaveny působení vlhka a tepla. Praktické, ale i laboratorní případy potvrzují, že beton vystavený působení střídavého vysušování a nasycování vodou je mnohem náchylnější na nadměrné rozpínání v důsledku ASR, než beton vystavený trvale vlhku. ASR postupuje všude tam, kde se může zdržovat voda. Jedná se především o konstrukce bez ochrany, jedná se obvykle o samostatně stojící stěny, trámy, sloupy. Porušení se ještě zvyšuje působením mrazu a při tání. Trhliny v důsledku působení ASR vznikají i v betonu, který je ve styku s vlhkými zeminami. Největší množství trhlin vzniká v místě styku betonu se zeminami na úrovni povrchu zemin, kde nastávají značné změny vlhčení a sušení. Rychlost ASR zvyšuje také působení chloridu sodného, sodík a chloridové ionty reagují za vzniku chloroaluminátů. Pokud koncentrace

chloridu sodného překročí přibližně 5 %, rychlost reakce se razantně zvýší. Samozřejmě také vždy záleží na vlastnostech a složení betonu. Bylo zjištěno, že provzdušnění betonu snižuje míru rozpínání ASR. Avšak samotné provzdušnění nelze považovat za účinný prostředek zabráňující nadměrnému rozpínání v důsledku ASR. Závěrem této kapitoly je nutno říci, že i když budou přítomny všechny výše uvedené složky pro vznik ASR, pravděpodobně k této reakci dojde, není to však striktně dané, protože tato problematika je daleko složitější, mnohdy pro ni nemáme zcela přesné vysvětlení a názory a průběh alkalicko-křemičité reakce se odlišují [7,17].

6.3 Princip vzniku ASR, rozpínání a následky

Přítomnost hydroxylových iontů v pórové kapalině v betonu, chemicky reagují s různými formami oxidu křemičitého přítomného v mnoha typech kameniva. Hydroxylových iontů je tím více, čím vyšší je obsah sodíku a draslíku v betonu a to má za následek vyšší pH. Se zvyšujícím se pH se zvyšuje reaktivnost pórové kapaliny s reaktivním oxidem křemičitým. Tato reakce oxidu křemičitého, pórové kapaliny s alkáliemi má za následek vznik alkalicko-křemičitého gelu, ten pohlcuje další vodu a bobtná, zvětšuje tedy svůj objem, to má za následek expanzivní napětí, které způsobuje vznik trhlin. První trhlinky vznikají tam, kde jsou vazebné síly ve struktuře betonu nejslabší a to okolo zrn kameniva, což má za následek vznik rekčních prstenců okolo zrn. Vznik gelu a jeho další pnutí má dále za následek vznik trhlin uvnitř kameniva a v cementovém kamení. U vyztužených betonových konstrukcí se zvyšují tahová napětí v betonářské výztuži. Během tohoto rozpínání pak dochází ke snižování pevnosti v tlaku, velmi výrazně pak klesá modul pružnosti a pevnosti betonu v tahu. Trhlinky vznikající na zrnech kameniva se šíří maltou a přechází pak do souvislých ploch. Některými průvodními procesy mohou být, trhlinky na zrnech hrubého kameniva i v maltě, impregnace okrajů trhlin průhledným nebo bílým gelem, povlaky vápenato-křemičitého gelu, povlaky a výplně pórů v betonu gelem a místy i průhledné výpotky gelu na povrchu konstrukce. Rychlost ASR je však nízká, popsání příznaky nemusí být patrné několik let. Zřídka se gel objeví, ale neprokazují se žádné poruchy, většinou je vznik gelu doprovázen trhlinami a poruchami důsledkem působení tlaku gelu ve struktuře betonu [17,19].

Jak působí ASR v lehkém betonu z pěnového skla, se dozvědět ze studie, kterou udělali Bumanis, Bajare, Locs, Korjakins. Použili několik druhů cementů a zjistili, že zrna kameniva pěnového skla byly ve všech případech vážně poškozeny, bez ohledu na druh použitého cementu. Výsledkem zkoušení bylo, že výběr cementu nemohl ani v jednom případě zabránit ASR v lehkém betonu vyrobeného z pěnového skla. Nevylučuje se však, že

správný výběr cementu s nízkým Na_2O ekvivalentem mohl konečné následky ASR snížit, protože cementy s nejnižším Na_2O ekvivalentem ($< 0,12$), expanzivní reakci omezovaly a mírně zpomalovaly tvorbu ASR gelu[20].

Jak průběhu vzniku ASR zpomalit a časově oddálit se zabývali pánové Ekol, Rakgosi a Hooton. Zjistili, že dusičnan lithný zmírňuje účinek ASR v betonu. Přimícháním LiNO_3 do směsi betonu, mělo za následek zpoždění a zmírnění této reakce. Jednalo se o 6 let dlouhou studii, která prokázala mnohem menší trhliny ve struktuře zkušebních těles betonu, kde byl použit LiNO_3 , než u betonů kde použit nebyl [23].

7. CÍLE PRÁCE

V diplomové práci je řešena problematika a možnosti využití lehkého kameniva na bázi pěnového skla pro výrobu velmi lehkých betonů se zaměřením na tepelně izolační vlastnosti. Především se jedná o využití drceného pěnového skla, jako plnivo do betonu, které by mělo umožňovat regulaci tepelně izolačních vlastností v souvislosti se změnou objemové hmotnosti těchto betonů.

Jedním z cílů teoretické práce je popis používaných lehkých kameniv v oblasti lehkých betonů, se zaměřením na kameniva ze skelného recyklátu a především kameniva na bázi pěnového skla. Součástí je popis technologie výroby těchto kameniv pro výrobu lehkých betonů a rizika související s výrobou, ale také s trvanlivostí těchto speciálních lehkých betonů. V teoretické části jsou shrnuty aktuální poznatky z dané problematiky. Značná část je také věnována i popisu vzniku možných rizik v souvislosti s použitým materiálem. Především se jedná o alkalicko-křemičitou reakci. Tato otázka je často skloňována právě v souvislosti použití materiálu na bázi skla v alkalickém prostředí.

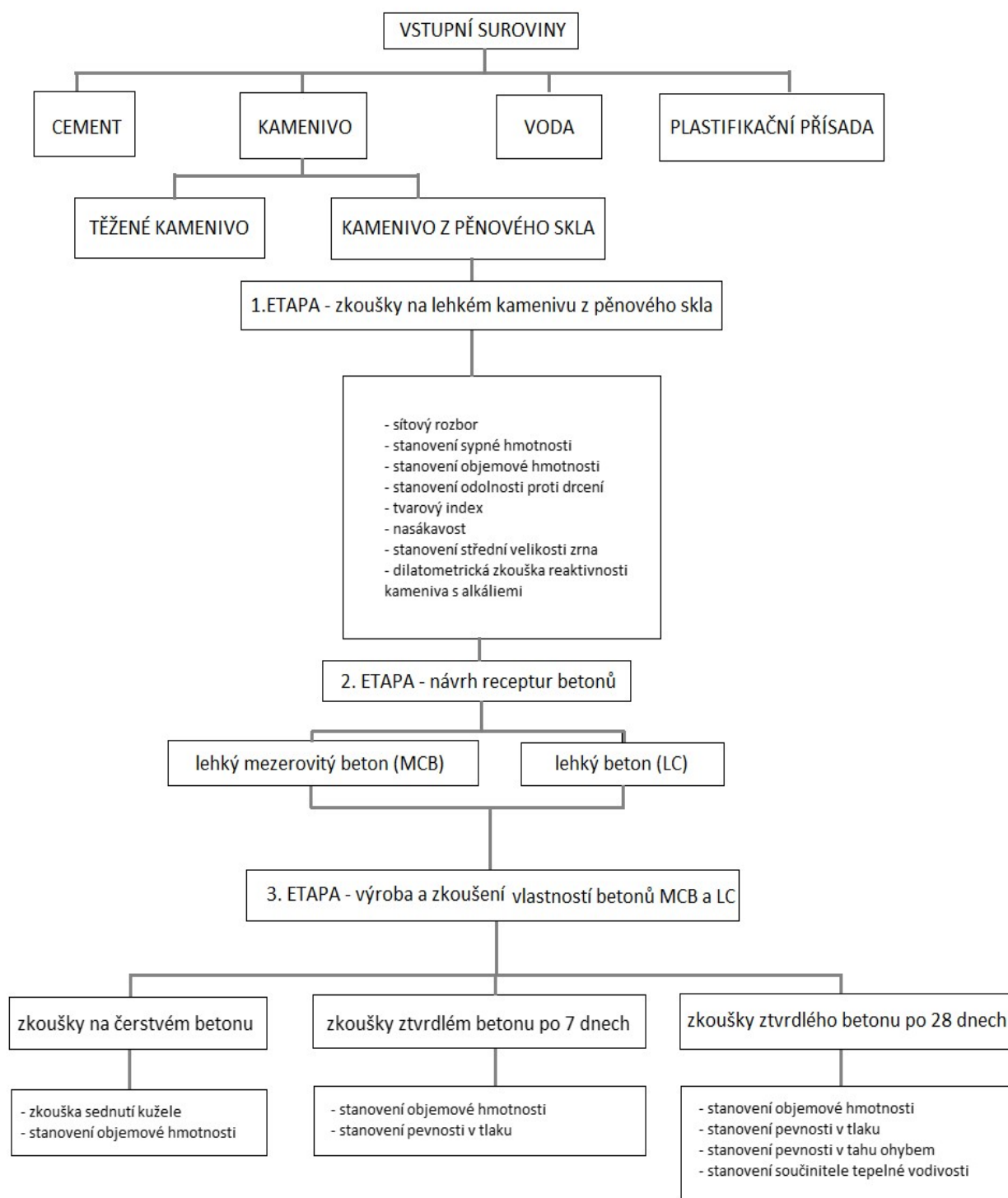
V praktické části diplomové práce je hledáno složení betonové směsi pro dosažení optimálních mechanických vlastností a tepelně izolačních vlastností. V praktické části je provedena analýza vlastností drceného kameniva z pěnového skla. Na základě poznatků teoretické části je také ověřeno riziko možného vzniku alkalicko-křemičitého rozpínání kameniva na bázi skelného recyklátu, které je často skloňováno u tohoto typu kameniva při využití v alkalickém prostředí betonů. Dále je cílem praktické části práce navržení velmi lehkých mezerovitých betonů a lehkých betonů s využitím lehkého kameniva z pěnového skla. Především je zde řešena problematika regulace tepelně izolačních vlastností a mechanické odolnosti lehkých betonů.

8. PRAKTICKÁ ČÁST

8.1 Metodika práce

Praktickou část lze rozdělit do několika dílčích etap. První etapou je stanovení vlastností nově vyvinutého lehkého kameniva z pěnového skla. Jedná se o kamenivo ze skelných střepů, respektive z těch střepů, které se obtížně využívají ve sklářském průmyslu a stávají se tak přebytkovou surovinou. V druhé etapě se řeší návrh receptur dvou druhů betonů, a to velmi lehkých mezerovitých betonů a lehkých hutných betonů. K vylehčení betonů je použito lehké kamenivo z pěnového skla Refaglass, které vyniká velmi nízkou objemovou hmotností. Třetí etapa zahrnuje výrobu a zkoušení vlastností betonů velmi lehkých mezerovitých (MCB) a lehkých hutných (LC). Třetí etapa tedy zahrnuje také zkoušky na čerstvém betonu a zkoušky na betonu ztvrdlém. Cílem je optimalizovat návrh receptur tak, abychom dosáhli co nejlepších tepelně izolačních vlastností, za přijatelné objemové hmotnosti a zachování co nejvyšších mechanických vlastností.

Při provádění praktické části se postupovalo po jednotlivých etapách, které již byly zmíněny v předchozím odstavci. Pro lepší představu slouží schéma na obrázku 9.



Obrázek 9: Metodika práce a její jednotlivé etapy

8.2 Použité materiály

Pro výrobu navržených velmi lehkých mezerovitých a lehkých betonů byly použity následující suroviny:

- cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, CEM I 42,5 R, Českomoravský cement a.s., závod Mokrá,
- kamenivo 0–4 mm Žabčice, drobné těžené kamenivo, ZEPIKO spol. s.r.o.,
- lehké kamenivo z pěnového skla 4-16 mm, REFAGLASS s.r.o.,
- lehké kamenivo z pěnového skla 16-32 mm, REFAGLASS s.r.o.,
- záměsová voda, voda pitná kohoutková,
- plastifikační přísada – STACHEPLAST BV – plastifikační přísada na bázi lignosulfonátů.

8.3 I. Etapa – stanovení vlastností drceného kameniva z pěnového skla

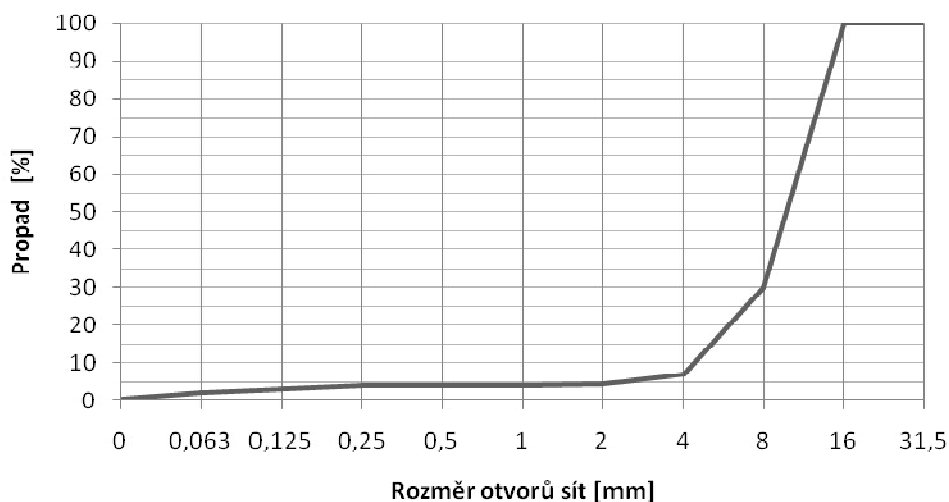
V první etapě byly sledovány vlastnosti lehkého pórovitého kameniva z pěnového skla Refaglass. Jedná se lehké o kamenivo, které je v tomto roce (2017) vyráběno novým výrobním způsobem, kamenivo má i jiné zabarvení oproti kamenivům, které společnost Refaglass vyráběla v dřívějších letech. Hlavní přínos nového výrobního způsobu má být zvýšení mechanických vlastností granulátu. Kamenivo se vyrábí ve třech frakcích 0-4 mm, 4-16 mm a 16-32 mm. Zkoušky však byly prováděny na frakcích 4-16 mm a 16-32 mm. Na každé frakci pak byly provedeny sítové rozbory a určena hodnota střední velikosti zrna, sypné hmotnosti ve stavu volně sypaném a setřeseném, objemové hmotnosti, odolnosti proti drcení, tvarový index a nasákavost. Na obrázku č. 10 vidíme zkoušené kamenivo z pěnového skla frakce 16-32 mm.



Obrázek 10: Kamenivo z pěnového skla Refaglass frakce 16-32 mm

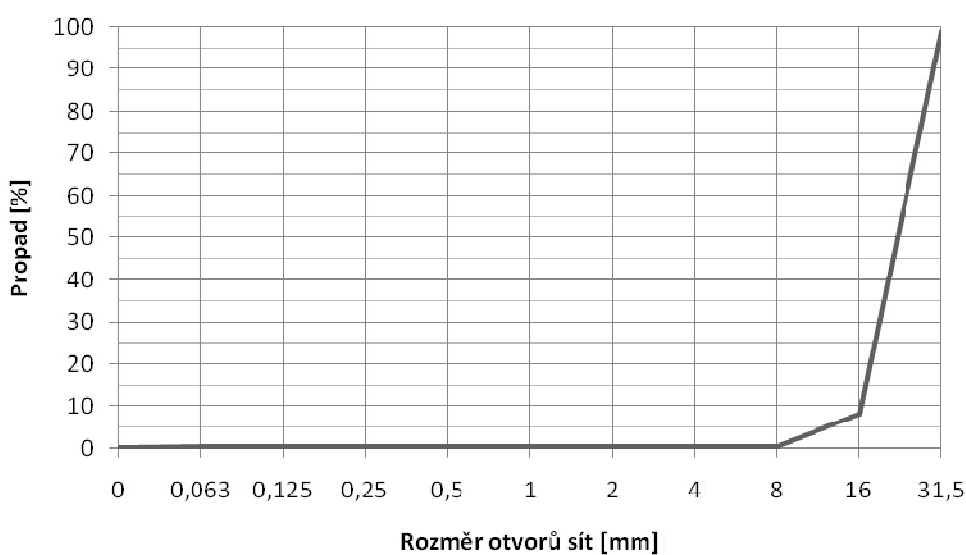
Sítový rozbor

Sítový rozbor byl proveden dle normy ČSN EN 933-1 Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor. Sítový rozbor byl proveden 2x na frakci 4-16 mm a 2x na frakci 16-32 mm. Kamenivo se nejprve vysušilo v sušárně při 100 °C do ustálené hmotnosti. Vysušená navážka granulátu se prosívala přes normová síta na střešacím stolku. Poté byly postupně váženy zůstatky na sítích, které se převedly na procentuální zastoupení a následoval přepočet, na procentuální propady. Dále byly zhotoveny křivky zrnitosti, které jsou graficky znázorněny na obrázcích 11 a 12.



Obrázek 11: Křivka zrnitosti drceného pěnového skla frakce 4-16 mm

Z křivky zrnitosti na obrázku 11 je patrné, jsou přítomna zrna o velikosti 4-16 mm, je zde také vidět, že jsou zastoupena i zrna, která propadla sítím 4 mm.



Obrázek 12: Křivka zrnitosti drceného pěnového skla frakce 16-32 mm

Z křivky zrnitosti frakce kameniva o velikosti zrn 16-32 mm je vidět obsah zrn menších než 16 mm, které činí přibližně 10% zastoupení.

Stanovení střední velikosti zrna

Na základě křivek zrnitosti byla dále stanovena střední velikosti zrna (hodnota d₅₀), tato hodnota je určena tak, že u propadu 50 % navážky kameniva je odečtena příslušná hodnota velikosti zrna. Střední velikost zrna u frakce 4-16 mm je d₅₀=10 mm a u frakce 16-32 mm d₅₀= 23mm. Stanovené hodnoty stření velikosti zrna byly očekávány v těchto mezích.

Stanovení sypné hmotnosti

Sypná hmotnost byla prováděna ve stavu kameniva volně sypaném a setřeseném. Zkoušelo se dle normy ČSN EN 1097-3: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. Zkouška byla opět provedena na obou frakcích kameniva tedy 4-16 mm a 16-32 mm. Opět se používalo kamenivo vysušené v sušárně na ustálenou hmotnost. Sypná hmotnost volně sypaného kameniva, byla provedena naplněním nádoby o objemu 4,979 l a hmotnosti 5320 g. Sypaní bylo provedeno, dle postupu v normě. Následně došlo k vážení plné nádoby. Stanovení sypné hmotnosti ve stavu setřeseném spočívá v tom, že se nádoba při plnění kamenivem hutní na vibračním stole. Výpočet volně sypaného a setřeseného kameniva byl vypočten dle vztahu:

$$\rho_b = \frac{(m_2 - m_1)}{V}$$

kde:

m₁... hmotnost prázdné nádoby [kg],

m₂... hmotnost nádoby se zkušební navážkou [kg],

V... objem nádoby v [l].

Tabulka 10: Sypné hmotnosti jednotlivých frakcí ve stavu volně sypaném a setřesené

STANOVENÍ SYPNÉ HMOTNOSTI		
frakce	volně sypané [kg/m ³]	setřesené [kg/m ³]
4-16 mm	290	360
16-32 mm	190	240

Stanovení objemové hmotnosti

Zkouška stanovení objemové hmotnosti byla provedena dle normy ČSN EN 13055-1: Pórovité kamenivo – Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty. Objemová hmotnost se stanovovala na obou frakcích, kamenivo pro tuto zkoušku se nechalo plně nasáknout vodou. Do odměrného válce se poté nalilo určité množství vody, které se zaznamenalo, následně se po ponoření určité navážky kameniva odečetla hodnota zvýšené hladiny vody. Následně se vypočítaly objemové hmotnosti ze vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

kde:

m... hmotnost navážky [kg],

V... objem navážky [m³].

Tabulka 11: Objemové hmotnosti jednotlivých frakcí drceného kameniva z pěnového skla

STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI	
frakce	objemová hmotnost [kg/m ³]
4-16 mm	780
16-32 mm	570

Tato zkouška je velmi důležitá, vidíme velmi nízké hodnoty objemových hmotností, s tímto kamenivem můžeme tedy později dosáhnout značného vylehčení betonu. Získání objemových hmotností je také klíčovým parametrem pro návrh složení betonu.

Stanovení pevnosti zrn pórovitého kameniva

Další zkouškou na lehkém kamenivu z pěnového skla je zkouška pevnosti zrn, tato zkouška se provádí dle normy ČSN EN 13055-1: Pórovité kamenivo – Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty. Tato zkouška může výrobcí kameniva ukázat, zda nový výrobní způsob granulátu, opravdu přinesl zvýšení mechanických vlastností. Pro tuto zkoušku se používá zkušební zařízení přesně specifikované v normě, jedná se o nádobu s pístem, do nádoby se plní a hutní kamenivo, jakmile je nádoba naplněna nandá se na ni píst, souprava se vloží do lisu a zaznamená se velikost potřebné síly ke stlačení o dané hodnotě. Výpočetní vztah je definován následně:

$$C_a = \frac{L + F}{A}$$

kde:

L... síla vyvozená pístem [N]

F... síla vyvozená pístem v [N]

A... plocha pístu [mm]

Tabulka 12: Stanovení pevnosti zrn kameniva

STANOVENÍ PEVNOSTI ZRN KAMENIVA	
frakce	pevnost [MPa]
4-16 mm	0,87
16-32 mm	0,89

Tvarový index

Tvarový index se měří speciálním posuvným měřítkem, kde se posuzuje vhodnost jednotlivých zrn kameniva. Pokud je poměr stran kameniva do poměru 1:3, považujeme zrno jako kubické tedy vhodné do betonu, pokud je poměr stran větší, zrno je tzv. nekubické, tedy do betonu nevhodné. Tvarový index se dělá dle normy ČSN EN 933-4 (721193): Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 4: Stanovení tvaru zrn - Tvarový index. Výpočetní vztah je dán:

$$SI = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100$$

kde: M_1 ... hmotnost zkušební navážky [g],

M_2 ... hmotnost nekubických zrn [g].

Tabulka 13: Tvarový index

TVAROVÝ INDEX	
frakce	tvarový index [%]
4-16 mm	68
16-32 mm	12

Z hodnot je patrný vysoký tvarový index u frakce 4-16 mm, 68 % > 50 % (hraniční hodnota vhodnosti kameniva do betonu), tato frakce se bohužel nejeví jako optimální pro výrobu betonu. Frakce 16-32 mm je z tohoto pohledu bez problému a tedy do betonu vhodná.

Stanovení nasákavosti zrn kameniva

Poslední prováděnou zkouškou na granulátu z pěnového skla byla nasákavost. Hovoří se o minimální nasákavosti tohoto materiálu, avšak logickou úvahou lze dojít k tomu, že materiál s otevřenou pórovitou strukturou, nějakou nasákavost přeci jen mít bude. Připravená vysušená navážka na ustálenou hmotnost se dala nasáknout do nádoby s vodou, následně se nasákavost měřila po 1 hodině a po 24 hodinách. Výpočtním vztahem níže, se dospělo k výsledkům v tabulce:

$$n = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100$$

kde: m_n ... hmotnost nasáklé zkušební navážky [g],

m_s ... hmotnost vysušené zkušební navážky [g].

Tabulka 14: Stanovení nasákavosti zrn kameniva

STANOVENÍ NASÁKAVOSTI ZRN KAMENIVA		
frakce	nasákavost po 1 hodině [%]	nasákavost po 24 hodinách [%]
4-16 mm	41,7	44,7
16-32 mm	21,9	25,8

Z výsledků je patrné, že se potvrdila předchozí úvaha, tuto informaci je potřebné vědět pro následné návrhy receptur a počítat tak s větším množstvím vody, potřebné k výrobě betonové směsi.

Dilatometrická zkouška reaktivnosti kameniva s alkáliemi

Důvod provedení této zkoušky na kamenivu Refagglas je obsah velkého množství SiO_2 , jeho přítomnost tedy může zapříčinit následné nastartování alkalicko-křemičité reakce, vznik alkalicko-křemičitého gelu, jeho postupné bobtnání a způsobit trhliny až destrukci betonu. Provedla se tedy zkouška dle Technických podmínek Ministerstva dopravy, TP 137, vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací, měřicí metoda nese označení, zkušební dilatometrická metoda cementové malty pro stanovení rizikové reaktivnosti kameniva s alkáliemi. Jedná se o 16. denní metodu maltových trámečků, tato metoda je zpracována dle normy ASTM C 1260-14. Kamenivo Refaglass bylo nutné vysušit v sušárně do ustálené hmotnosti. Vysušené kamenivo se muselo dále podrtit na drobné frakce. V této zkoušce je přesně předepsáno procentuální zastoupení jednotlivých frakcí, které můžeme vidět v tabulce 15.

Tabulka 15: Procentuální zastoupení jednotlivých frakcí kameniva [26]

Velikost zrn kameniva		Hmotnost
na sítích dle ASTM	na sítích dle ČSN	% hm.
–	4–5	3
2,36–4,752	2–4	12
1,18–2,36	1–2	25
0,6–1,18	0,5–1	27
0,3–0,6	0,25–0,5	23
0,15–0,3	0,125–0,25	10

Nadrcené kamenivo se tedy prosilo sítý, jakmile bylo navysíváno dostatečné množství každé frakce, mohlo se přejít k míchání malty. Malta má striktně dané složení, 1 díl cementu, 2,25 dílů kameniva a vodní součinitel 0,47. Míchání probíhalo ručně, když byla záměs dostatečně dobře promíchána, začala se plnit forma na 3 trámečky o rozměrech 25×25×285 mm. Hutnění probíhalo ve dvou vrstvách a povrch se uhladil hladítkem několika tahy. Naplněná forma se ihned umístila do vlhké komory s teplotou 20 ± 5 °C a relativní vlhkostí ≥ 95 %. Zkušební tělesa zůstala ve formě 24 hodin, po vyjmutí se opařila vodou, aby nedošlo k úniku vlhkosti. Na tělesa se nalepily měřicí terčíky, které se srovnaly podle příslušného etalonu. Nachystal se kontejner s pitnou vodou, do kterého se tělesa ponořily, tak aby byla celá schovaná pod hladinou a kontejner se umístil do sušárny na 24 hodin s teplotou 80 ± 2 °C. Po 24 hodinách proběhne nulové čtení, to probíhá vyjmutím zkušební tělesa z kontejneru, osušením, příslušným měřidlem změření vzdáleností přilepených kovových kontaktů. Poté se tělesa neukládají zpět do kontejneru s vodou, ale do kontejneru s roztokem NaOH. Roztok NaOH byl přesně nachystán dle předpisů, a to že se v jednom litru vody rozpustilo 45 gramů hydroxidu sodného. Roztoku se nachystalo potřebné množství, aby zkušební tělesa byla opět zcela ponořena. Roztok s tělesy se opět umístil do sušárny s teplotou 80 ± 2 °C. Následné měření se provádělo periodicky nejméně každé dva dny po dobu 14 dní po nulovém čtení. Zaznamenané hodnoty se poté dosadí do vztahu:

$$L = \frac{(L_x - L_i)}{G} \cdot 100$$

kde: L ...změna délky bez ohledu na stáří [%],

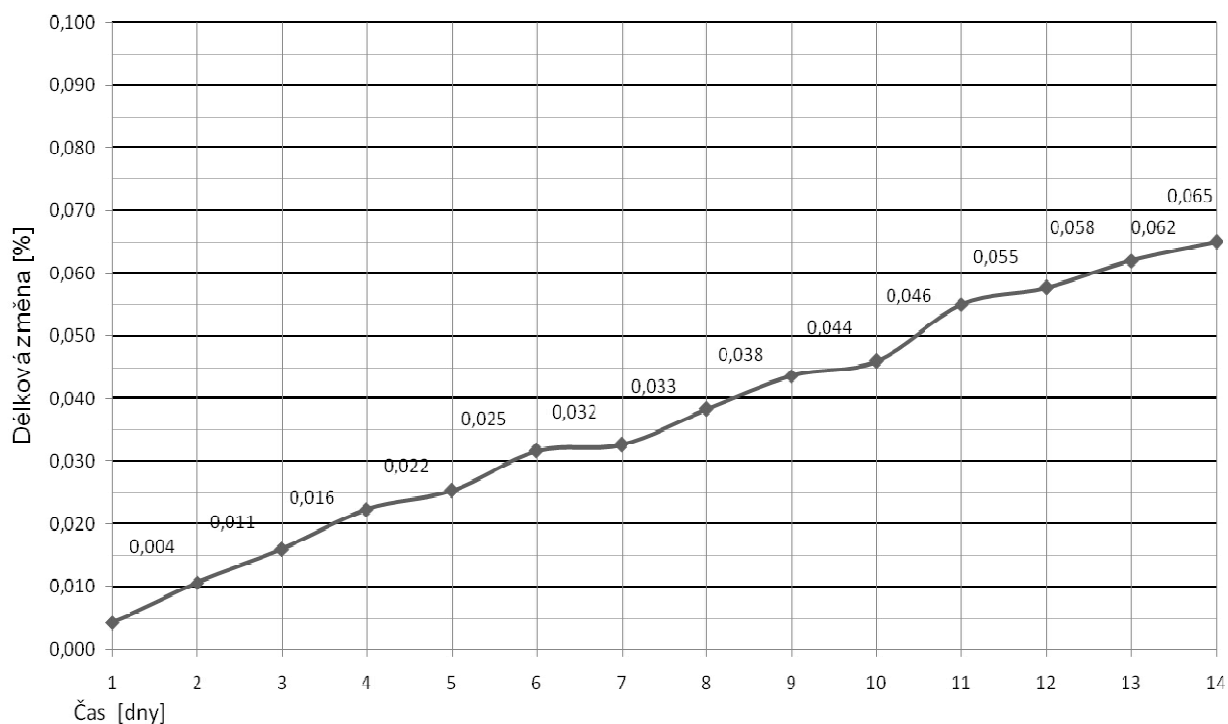
L_x ... čtení hodnoty vzorku,

L_i ...počáteční měření vzorku,

G ...nominální měřená délka dle měřicího přístroje [100 mm].

Tabulka 16: Vypočítané délkové změny L, v jednotlivých dnech měření

Délkové změny L v jednotlivých dnech měření				
den 2017	A	B	C	průměr L [%]
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,004	0,001	0,008	0,004
2	0,008	0,003	0,021	0,011
3	0,014	0,006	0,028	0,016
4	0,024	0,012	0,031	0,022
5	0,025	0,018	0,033	0,025
6	0,030	0,023	0,042	0,032
7	0,030	0,024	0,044	0,033
8	0,032	0,032	0,051	0,038
9	0,034	0,042	0,055	0,044
10	0,034	0,046	0,058	0,046
11	0,039	0,053	0,073	0,055
12	0,044	0,053	0,076	0,058
13	0,052	0,056	0,078	0,062
14	0,055	0,059	0,081	0,065



Obrázek 13: Závislost průměrné délkové změny L na stáří vzorku

Pro hodnocení délkové změny při zkoušce alkalicko-křemičitého rozpínání, je nezbytná klasifikace, která je uvedena v tabulce 17.

Tabulka 17: Klasifikace kameniva do betonu z hlediska rizika reakce s alkáliemi [26]

Zkušební metoda	Jednotky	Rizikovitost přírodního kameniva (zkouškou zjištěné hodnoty)		
		Nízká	Střední	Vysoká
Dilatometrická dle ASTM C-1260-14 (upravená podle přílohy č. 1 těchto TP)	% délky	$\leq 0,100$	$> 0,100-0,200$	$> 0,200^{1)}$

Na základě délkové změny v posledním dnu měření, kdy byla průměrná délková změna $L = 0,065 \% \leq 0,100 \%$, můžeme provést hodnocení. Z dosažených výsledků délkové změny vyplývá, že riziko reakce kameniva s alkáliemi je nízké.

8.4 II. Etapa – návrh jednotlivých receptur betonů

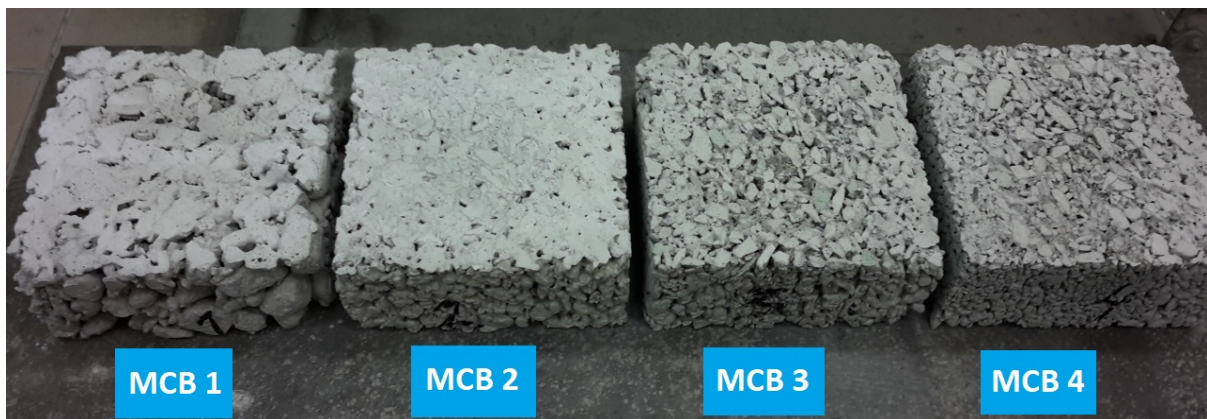
Tato část práce je věnována návrhu jednotlivých receptur betonů. Jsou zde uvedeny navržené receptury velmi lehkých mezerovitých (MCB) a lehkých hutných betonů (LC), které jsou rozděleny do dvou skupin podle typu betonu.

8.4.1 Návrh velmi lehkých mezerovitých betonů

Specifikace těchto betonů, použití a vlastnosti, bylo řešeno v teoretické části této práce. Jedná se tedy o betony s velkou mezerovitostí, je zde vynechaná jemná složka plniva, důraz se klade na velmi nízkou objemovou hmotnost, na dobré tepelně izolační vlastnosti, zachování mechanických vlastností je samozřejmě také důležité, ale tyto betony většinou plní funkci tepelně izolačních a výplňových vrstev.

PŘEHLED SLOŽENÍ RECEPTUR				
SUROVINA	RECEPTURA			
	MCB 1	MCB 2	MCB 3	MCB 4
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
Cement CEM II/B-M(S-LL) 32,5 R	150	170	110	80
voda	55	65	50	50
Kamenivo 4-16 RefaGlass	140	360	360	360
Kamenivo 16-32 RefaGlass	140	-	-	-
Plastifikační př. Stacheplast (BV)	1,2	1,2	1,2	1,2

Tabulka 18: Receptury velmi lehkých mezerovitých betonů (MCB)



Obrázek 14: Vzorky velmi lehkých mezerovitých betonů

8.4.2 Návrh lehkých hutných betonů

Lehké hutné betony se od předchozí varianty mezerovitého betonu liší tím, že je snaha o dokonalé zhutnění, bez mezer tak, aby byla zachována homogenita lehkého hutného betonu při dokonalém hutnění. Snahou je dosažení dobrého poměru mechanických a tepelně izolačních vlastností, které souvisí zpravidla s objemovou hmotností. Lze tedy obecně říci, že čím nižší objemová hmotnost betonu bude, mělo by být dosaženo nižšího součinitele tepelné vodivosti. S nižší objemovou hmotností však dochází k poklesu mechanických vlastností. Je tedy žádoucí, aby byla předem definována kritéria, které potřebujeme dosáhnout v závislosti na požadavcích a pro konkrétní lehký beton. Použitím lehkého kameniva do betonu je možné zásadně změnit. Cílem je tedy optimalizovat složení betonů tak, abychom dosáhli co nejvyšších mechanických pevností s maximálním snížením objemové hmotnosti, co nejlepšími tepelně izolačními vlastnostmi a také s dobrou zpracovatelností čerstvého betonu.

Tabulka 19: Složení lehkých hutných betonů (LC)

PŘEHLED SLOŽENÍ RECEPTUR											
SUROVINA	RECEPTURA										
	LC 1	LC 2	LC 3	LC 4	LC 5	LC 6	LC 7	LC 9	LC 10	LC11	LC12
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
Cement CEM II/B-M(S-LL) 32,5 R	380	250	250	380	380	380	-	280	380	380	280
Cement CEM I 42,5 R	-	-	-	-	-	-	380	-	-	-	-
voda	200	190	190	200	200	200	200	200	200	200	200
Kamenivo 0-4, Žabčice	850	900	580	850	850	450	850	850	750	750	750
Kamenivo 4-16 RefaGlass	280	310	410	-	120	240	280	140	140	310	170
Kamenivo 16-32 RefaGlass	-	-	-	210	120	120	-	120	120	-	120
Plastifikační př. Stacheplast (BV)	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8



Obrázek 15: Vzorky lehkých hutných betonů

8.5 III. Etapa – výroba a zkoušení vlastností betonů MCB a LC

Pro přípravu čerstvého betonu byla použita laboratorní míchačka s nuceným oběhem. Jednotlivé složky byly dávkovány hmotnostně a dávkování probíhalo v následujícím pořadí. Velmi lehké hutné betony MCB byly dávkovány takto, nejprve se do míchačky vsypalo kamenivo Refaglass, hned po něm cement a směs se nechala několik minut promíchat, jakmile byla směs dostatečně homogenizována, začala se dávkovat voda, po několika desítkách sekund se začala přilévat také plastifikační přísada. Takto nadávkovaná směs se nechala promíchat dostatečně dlouho dobu, aby se pórovité kamenivo dostatečně nasýtilo a neodebíralo nám poté vodu potřebnou k hydrataci cementu. Směs se nechala promíchat cca 10 minut a byla připravena k dalšímu užití. Lehké hutné betony LC se míchaly téměř stejným způsobem, rozdíl byl v tom, že se ke kamenivu Refaglass a cementu přisypalo ještě jemné těžené kamenivo, směs těchto tří složek se dostatečně nechala homogenizovat, poté se opět přilila voda a po ní plastifikační přísada. Dodržet tento postup míchání bylo velice důležité, a to z důvodu, že pokud bychom velmi lehké kamenivo Refaglass nenechali obalit cementem a přidali jej až po vsypání jemných složek, díky jeho velmi nízké objemové hmotnosti by nám pořád vyplouvalo na povrch, nepodařilo by se nám směs dostatečně dobře promíchat. Z čerstvého betonu byla následně vyrobena potřebná zkušební tělesa v požadovaném počtu pro provedení zkoušek sledovaných vlastností ztvrdlého betonu.

Zkušební tělesa

Od každé směsi bylo uděláno celkem 7 krychlí o velikosti hrany 150 mm, 3 krychle byly určeny pro zkoušku pevnosti v tlaku po 7 dnech, 3 krychle pro pevnost v tlaku po 28 dnech, 1 krychle byla určena k nařezání těles pro měření tepelné vodivosti. Dále se od každé receptury dělaly 2 trámce o rozměrech 100×100×400 mm. Trámce byly po 28 dnech vystaveny zkoušce tahu za ohybu. Formy na trámce se používaly ocelové. Formy pro výrobu krychlí z lehkého hutného betonu LC byly použity plastové, ze kterých se poté zatvrdlý beton vyfukuje tlakem vzduchu kompresoru. Zatvrdlé lehké mezerovité betony MCB bychom díky jejich struktuře z forem nevyfoukli, z tohoto důvodu se směs MCB plnila do ocelových rozmontovatelných forem. Všechny formy se před použitím vymazaly odbedňovacím přípravkem. Když bylo vše nachystáno, nastal čas betonovou směs do forem plnit a hutnit.

Hutnění betonové směsi

Hutnilo se na laboratorním vibračním stole. I hutnění je však nutné si rozdělit na hutnění betonů MCB a LC. Betony MCB se hutnili i na vibračním stole velice obtížně, objemová hmotnost zde již promíchané betonové směsi byla velice nízká, tento fakt bude přesně dán výpočtem objemových hmotností později. Obalená zrna kameniva Refaglass bylo někdy potřeba do forem i ručně natlačit, jinak by se zkušební tělesa nepodařilo ani vyrobit. U betonu LC se však muselo hutnit velice šetrně, aby nedošlo ke zbytečně dlouhému hutnění a lehká zrna Refaglass nezačali vystupovat na povrch a nedošlo tak separaci složek betonu. Při přípravě lehkých betonů s kamenivem na bázi pěnového skla bylo problematické, především při rostoucí dávce lehkého kameniva, se zhoršovala zpracovatelnost a byla náročnější výroba zkušebních těles pro požadované zkoušky. Jelikož bylo navrženo a mícháno více lehkých hutných betonů, byl vypočítán zajímavý závěr. Pokud obsah těženého kameniva a lehkého kameniva Refaglass vyjádříme u každé receptury procentuálním zastoupením, lze přibližně určit hranici, jak velké množství kameniva Refaglass je ještě vhodné dávkovat, nebo zda už je kameniva nadávkováno tolik, že se velmi razantně zhoršuje zpracovatelnost. Zpracovatelnost směsí nám ukazuje zkouška sednutí kužele.

Tabulka 20: Procentuální zastoupení frakcí kameniv v lehkých hutných betonech

beton	zastoupení kameniv v [%]			sednutí kužele [mm]
	Žabčice 0-4 mm	Refaglass 4-16 mm	Refaglass 16-32 mm	
LC1	75,2	24,8		35
LC2	74,4	25,6		30
LC3	58,6	41,4		25
LC4	80,2		19,8	120
LC5	78,0	11,0	11,0	100
LC6	55,6	29,6	14,8	10
LC7	75,2	24,8		40
LC8				
LC9	76,6	12,6	10,8	150
LC10	74,3	13,9	11,9	110
LC11	70,8	29,2		20
LC12	72,1	16,3	11,5	80
Poznámka: 100 % = součet celkového zastoupení všech druhů kameniv				

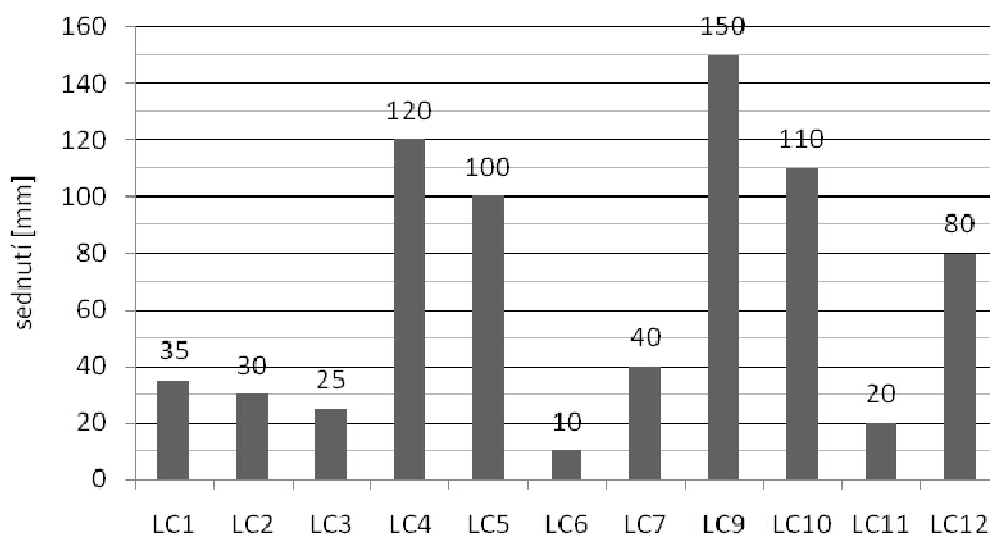
Pokud se podíváme na zpracovatelnost a podíl lehkého kameniva z celého množství použitého kameniva v jednotlivých lehkých betonech, je možné pozorovat, že když se množství kameniva Refaglass blíží hranici 30 %, nebo ji překračuje, zpracovatelnost se velice zhoršuje. Lze tedy uvažovat, že vzhledem ke zpracovatelnosti je vhodné lehké kamenivo na bázi pěnového skla dávkovat do 30 % z celkového množství kameniva.

Nejprve byly provedeny zkoušky na čerstvé betonové směsi. Bylo již zmíněno, že se jednalo o zkoušku sednutí kužele. U čerstvého betonu byla ještě stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu. Dále byla vyrobena tělesa pro zkoušky ztvrdlého betonu a byla uložena v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu nad 95 %. Po 7 dnech zrání byla stanovena objemová hmotnost a pevnosti v tlaku, tyto vlastnosti ztvrdlého betonu byly sledovány také po 28 dnech. Po 28 dnech byla také stanovena pevnost v tahu za ohybu a byly připraveny vzorky pro stanovení součinitel tepelné vodivosti z jádra betonu.

8.5.1 Zkoušení čerstvého betonu

Zkouška sednutí kužele

Tato zkouška se provedla v souladu s normou ČSN EN 12350-2 (731301) Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. Všechny příslušné pomůcky se navlhčily vodou, plnění kužele probíhalo ve 3 vrstvách a hutnilo se 25 vpichy každé vrstvy. Beton se na povrchu zarovnal a kužel se sejmul, změřilo se sednutí ocelovým měřítkem a zaznamenaly se hodnoty.



Obrázek 16: Sednutí kužele lehkých betonů LC

Sednutí kužele u velmi lehkých mezerovitých betonů bylo vždy 0 mm, a to z důvodu nízkého podílu cementu, nepřítomnosti jemné frakce kameniva, aby byla zachována mezerovitá struktura betonů a nedocházelo k sedimentaci cementového tmele. Na zpracovatelnost lehkých betonů mělo velký vliv zastoupení jednotlivých druhů kameniv. Sednutí u LC se pohybovalo od 10 do 150 mm.

Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

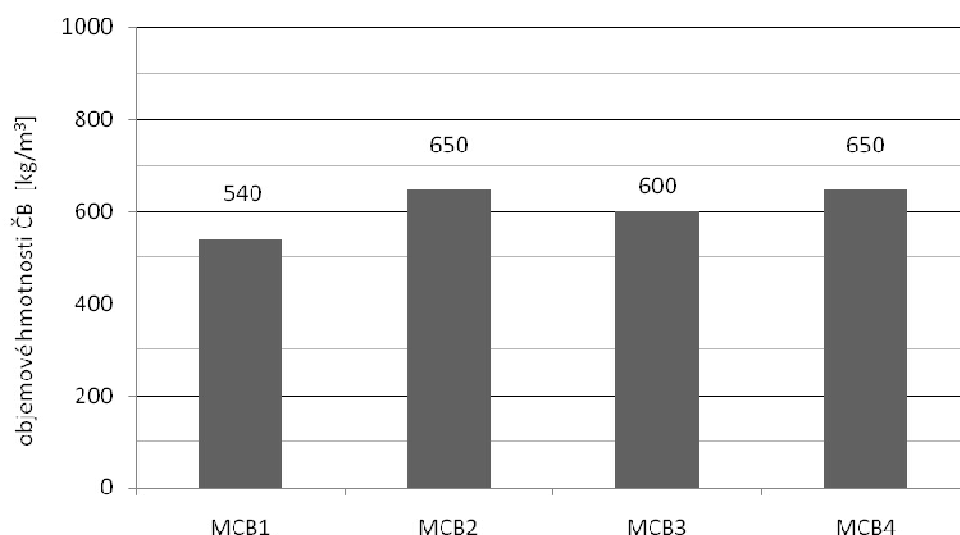
Stanovení objemové hmotnosti spočívalo ve zvážení naplněných forem betonem, odečtením hmotnosti formy a přepočítáním na objemovou hmotnost dle výpočetního vztahu:

$$D_{\check{C}B} = \frac{m}{V}$$

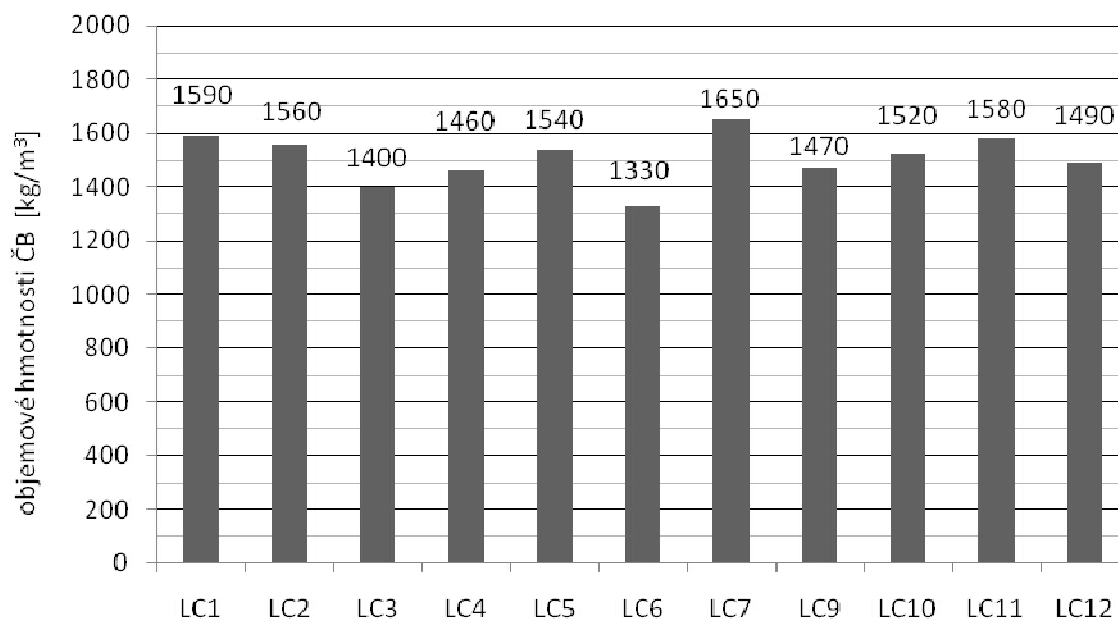
kde:

m... hmotnost čerstvého betonu [kg],

V... objem formy [m³].



Obrázek 17: Objemová hmotnost v čerstvém stavu betonů (MCB)



Obrázek 18: Objemová hmotnost v čerstvém stavu betonů LC

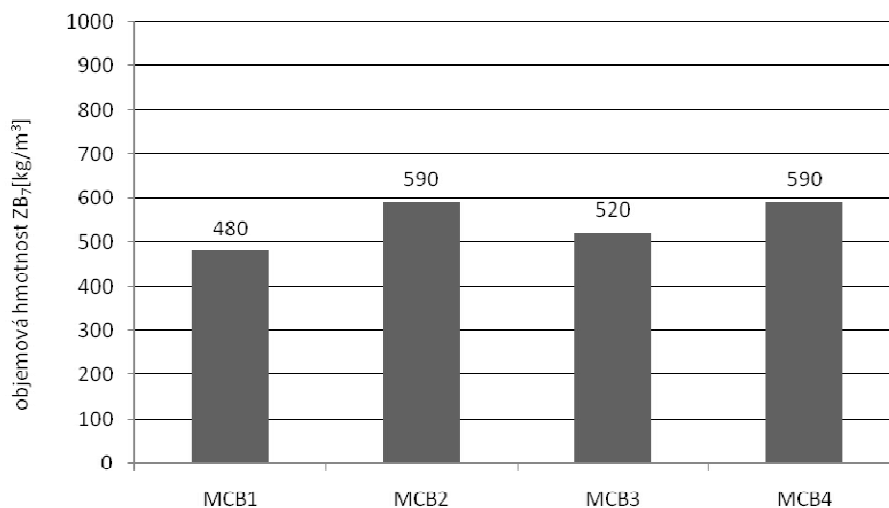
Objemové hmotnosti MCB a LC se velice liší, u MCB je to dáno především mezerovitou strukturou a využití pouze lehkého drceného kameniva z pěnového skla. Značný vliv má také nízká dávka cementu, aby bylo vytvořeno jen takové množství cementového tmele, dostatečné pro obalení lehkého kameniva a bylo zajištěno pouze pojení zrn lehkého kameniva na kontaktních místech při zachování mezerovité struktury. Objemová hmotnost velmi lehkých mezerovitých betonů v čerstvém stavu byla v rozmezí od 540 kg/m^3 do 650 kg/m^3 . U lehkých betonů se pohybovaly objemové hmotnosti v čerstvém stavu od 1330 kg/m^3 do 1650 kg/m^3 , zde je vyšší objemová hmotnost dána vyššími dávkami cementu, ale především přítomností a množstvím drobného těžkého kameniva frakce 0-4 mm.

8.5.2 Zkoušení ztvrdlého betonu po 7 dnech zrání

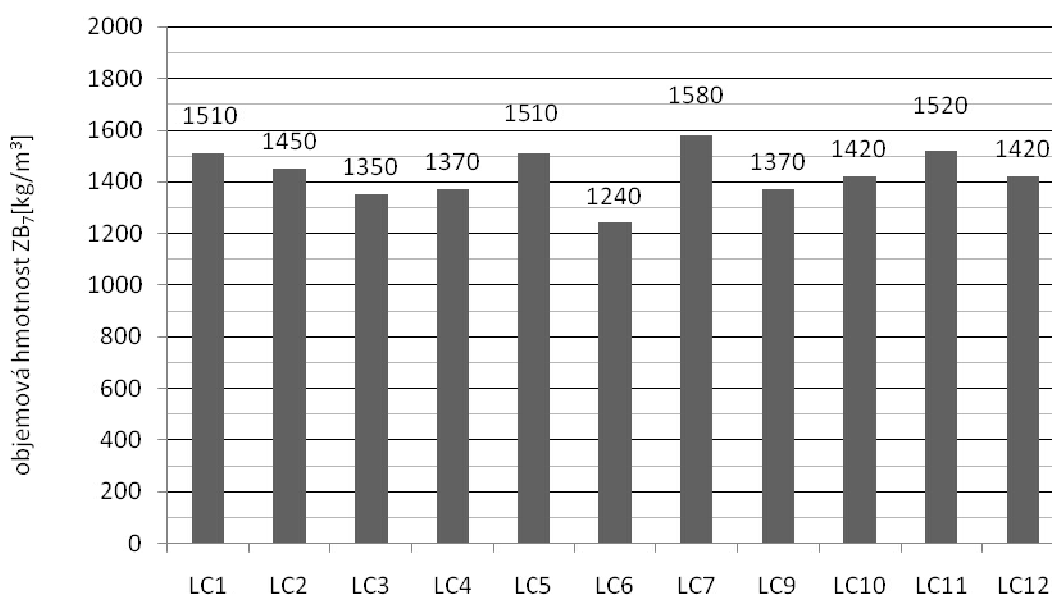
Po naplnění forem čerstvým betonem se směs nechala 24 hodin ztvrdnout, po této době se tělesa odformovala a uložila se do vlhké komory s teplotou $20 \pm 5 \text{ °C}$ a relativní vlhkostí $\geq 95 \%$. Zde se zkušební tělesa nechala zrán dalších 6 dní. Po 7 dnech zrání se vzaly 3 krychle o hraně 150 mm a byla stanovena objemová hmotnost ztvrdlého betonu (D_{ZB7}) a zkouška pevnosti v tlaku.

Stanovení objemové hmotnosti betonu po 7 dnech

Stanovení objemové hmotnosti po 7 dnech D_{ZB7} spočívala změřením rozměrů zkušebních těles posuvným měřítkem, zvážení a následným přepočtem na objemovou hmotnost.



Obrázek 19: Objemové hmotnosti ztvrdlých betonů D_{ZB7} betonů (MCB)



Obrázek 20: Objemové hmotnosti ztvrdlých betonů D_{ZB7} betonů LC

V grafu na obrázku 19 vidíme objemové hmotnosti MCB s hodnotami 480-590 kg/m³, s poklesem 60-80 kg/m³ proti objemovým hmotnostem čerstvých betonů. Pokles je způsoben spotřebou vody při hydrataci cementu a následném odpařováním vody v době zrání. V grafu na obrázku 20 betony LC, se pohybujeme v rozmezí 1240-1580 kg/m³, v tomto případě pokles hmotnosti představoval rozmezí 30-110 kg/m³.

Stanovení pevnosti v tlaku po 7 dnech zrání

Pevnost v tlaku zkušebních těles se prováděla v souladu s normou ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu-část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Pro tuto zkoušku je nutné změřit si rozměry plochy zkušebního tělesa. Poté se vloží zkušební těleso do lisu kolmo ke směru hutnění a vystaví se zatěžování lisu. Odečte se maximální zatížení při porušení tělesa. Následně se vypočte pevnost v tlaku ze vztahu:

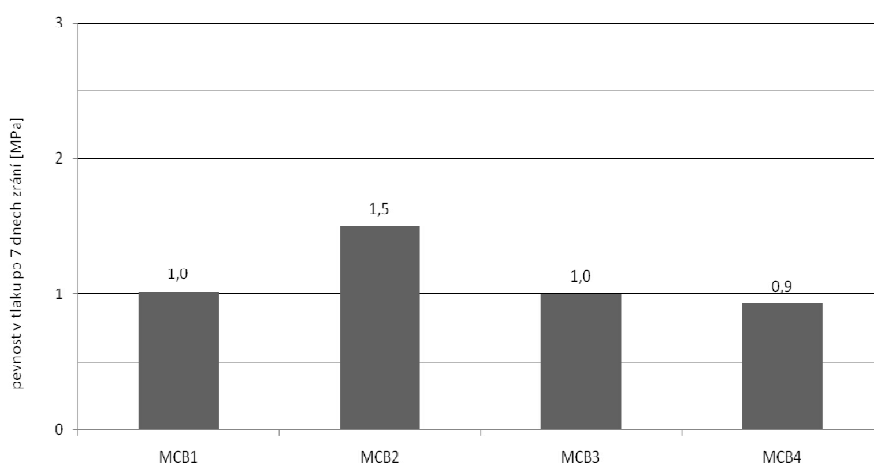
$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde:

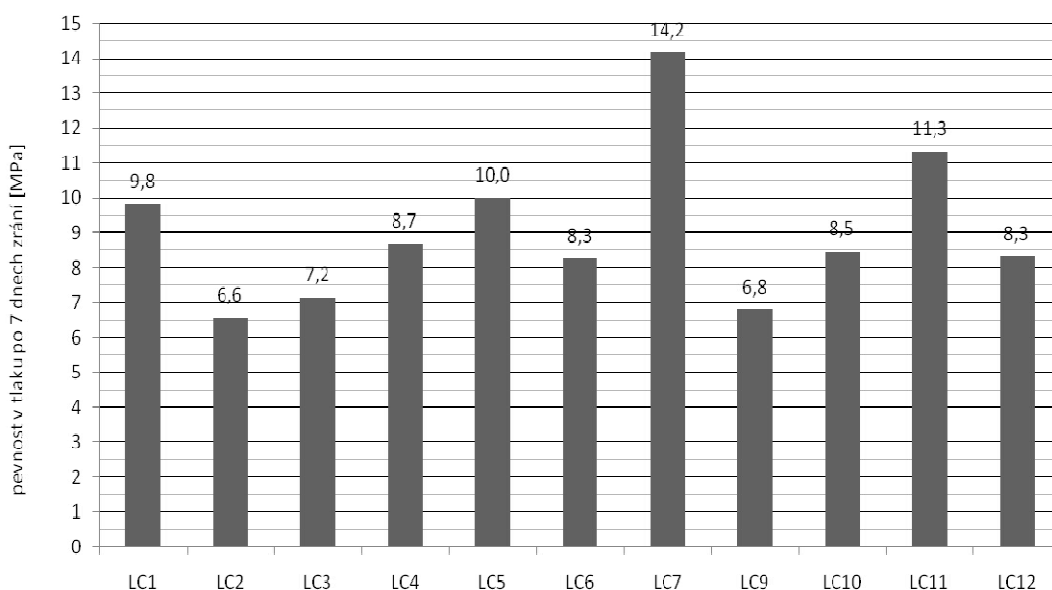
$f_{c...}$ pevnost betonu v tlaku [MPa],

$F...$ maximální zatížení při porušení tělesa [N]

$A_{c...}$ plocha zkušebního tělesa [mm²].



Obrázek 21: Pevnosti betonu v tlaku f_{c7} betonů MCB



Obrázek 22: Pevnosti betonu v tlaku f_{c7} betonů LC

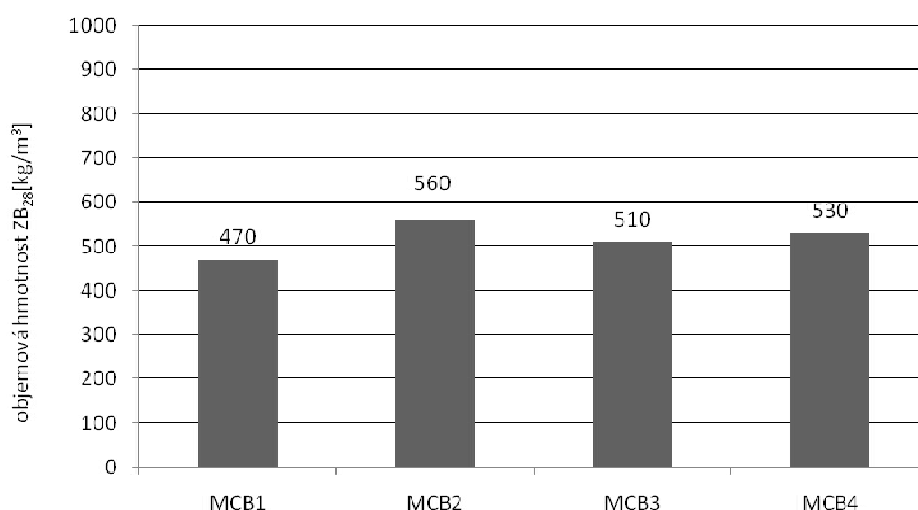
Z grafů je patrný rozdíl pevností mezi betony MCB a LC, MCB se pohybují od 0,9 MPa do 1,5 MPa, LC potom od 6,6 MPa do 14,2 MPa. Rozdíly jsou zapříčiněny hlavně chybějící jemnou frakcí těžného kameniva u betonů MCB. U betonů MCB jsou zrna spojena pouze na kontaktních místech, velmi brzy tedy dochází k destrukci, v tomto případě nemá velký vliv na výsledné pevnosti množství cementu, stačí pouze takové množství, dostatečné k obalení povrchu zrn lehkého kameniva. Přebytkový cementový tmel u betonů MCB by měl stejně při hutnění tendenci ztékát pórovitou strukturou a plnil by funkci plniva. Pevnosti v tlaku u betonů LC poté korespondují s jejich objemovými hmotnostmi. Z grafů objemových hmotností a pevností v tlaku vidíme, že se stoupající objemovou hmotností se zvyšuje pevnost v tlaku.

8.5.3 Zkoušení ztvrdlého betonu po 28 dnech zrání

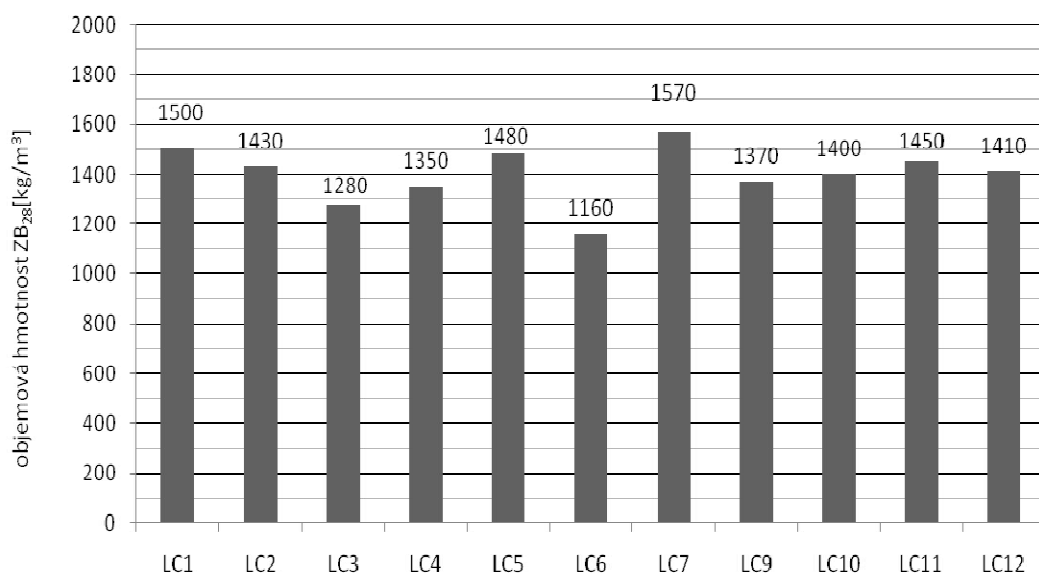
Zbýlá zkušební tělesa ve vlhké komoře, tedy 4 krychle o hraně 150 mm a 2 trámce 100×100×400 mm, se po 28 dnech zrání vzaly, aby se podrobily zbývajícím zkouškám. Provedla se pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, objemová hmotnost a stanovoval se součinitel tepelné vodivosti.

Stanovení objemové hmotnosti betonu po 28 dnech

Objemová hmotnost D_{CB28} se stanovovala úplně totožným způsobem jako objemová hmotnost po 7 dnech.



Obrázek 23: Objemové hmotnosti D_{ZB28} , betonů MCB



Obrázek 24: Objemové hmotnosti D_{ZB28} , betonů LC

Nyní si uvedeme kompletní hodnoty objemových hmotností, abychom je viděli komplexněji.

Tabulka 21: Objemové hmotnosti receptur MCB

beton	$D_{\text{čb}}$ [kg/m³]	D_{ZB7} [kg/m³]	D_{zb28} [kg/m³]	pokles po 28 d [kg/m³]
MCB1	540	480	470	70
MCB2	650	590	560	90
MCB3	600	520	510	90
MCB4	650	590	530	120

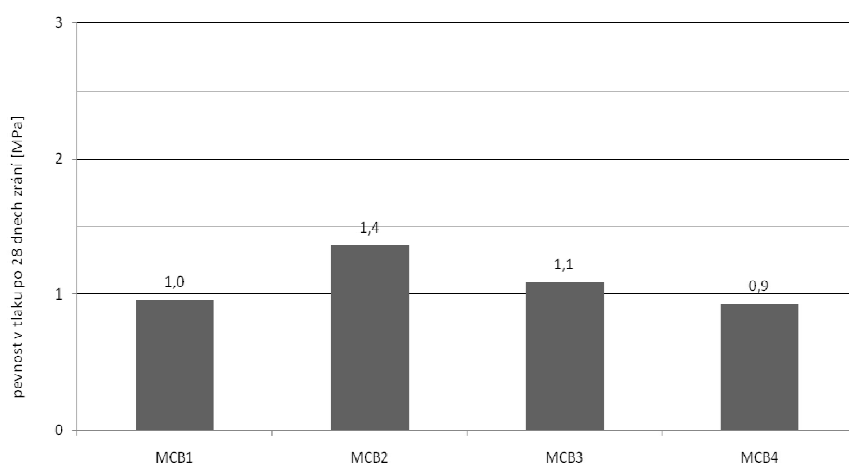
Tabulka 22: Objemové hmotnosti receptur LC

beton	$D_{\text{čb}}$ [kg/m³]	D_{ZB7} [kg/m³]	D_{zb28} [kg/m³]	pokles po 28 d [kg/m³]
LC1	1590	1510	1500	90
LC2	1560	1450	1430	130
LC3	1400	1350	1280	120
LC4	1460	1370	1350	110
LC5	1540	1510	1480	60
LC6	1330	1240	1160	170
LC7	1650	1580	1570	80
LC9	1470	1370	1370	100
LC10	1520	1420	1400	120
LC11	1580	1520	1450	130
LC12	1490	1420	1410	80

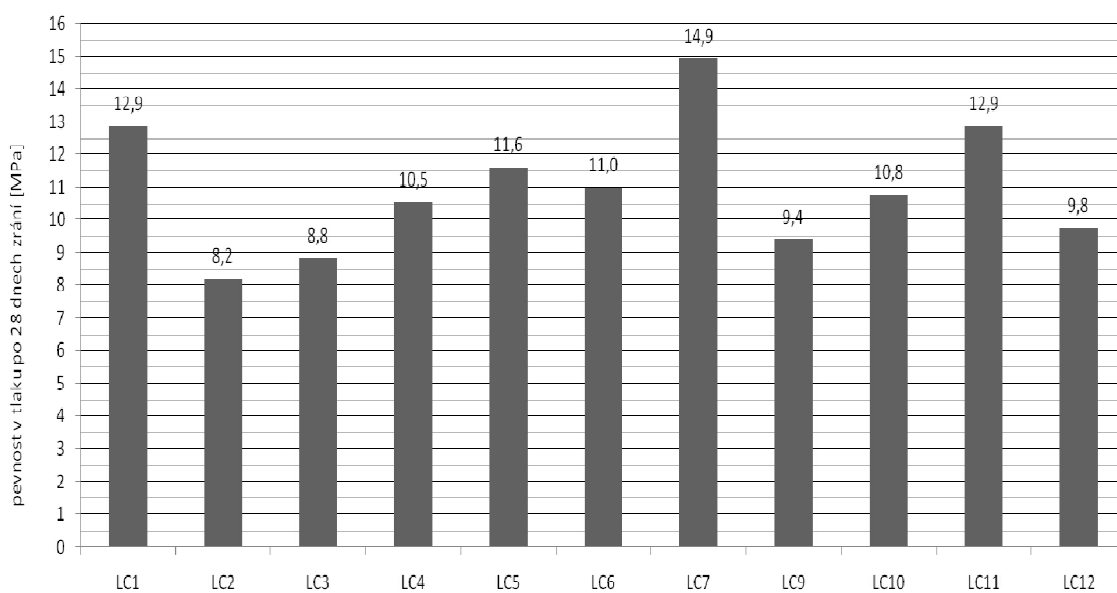
Z výsledků je patrné snižování objemové hmotnosti i po 28 dnech zrání. Poklesy jak již bylo řečeno, jsou zapříčiněny spotřebou vody při hydrataci cementu, vliv má tedy i dávka cementu, ale také odpařování přebytečné vody v době zrání. Vody se při míchání dávkovalo s drobným přebytkem oproti běžnému betonu z důvodu nasákavosti lehkého pórovitého kameniva. Došlo tedy k odpařování i této přebytečné vody, která ovšem podporuje vnitřní ošetřování betonu.

Stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání

Stanovení pevnosti v tlaku proběhlo také totožně jako po 7 dnech. Stanovovala se tedy pevnost v tlaku na 3 krychlích po 28 dnech zrání.



Obrázek 25: Pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání, betonů MCB



Obrázek 26: Pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání, betonů LC

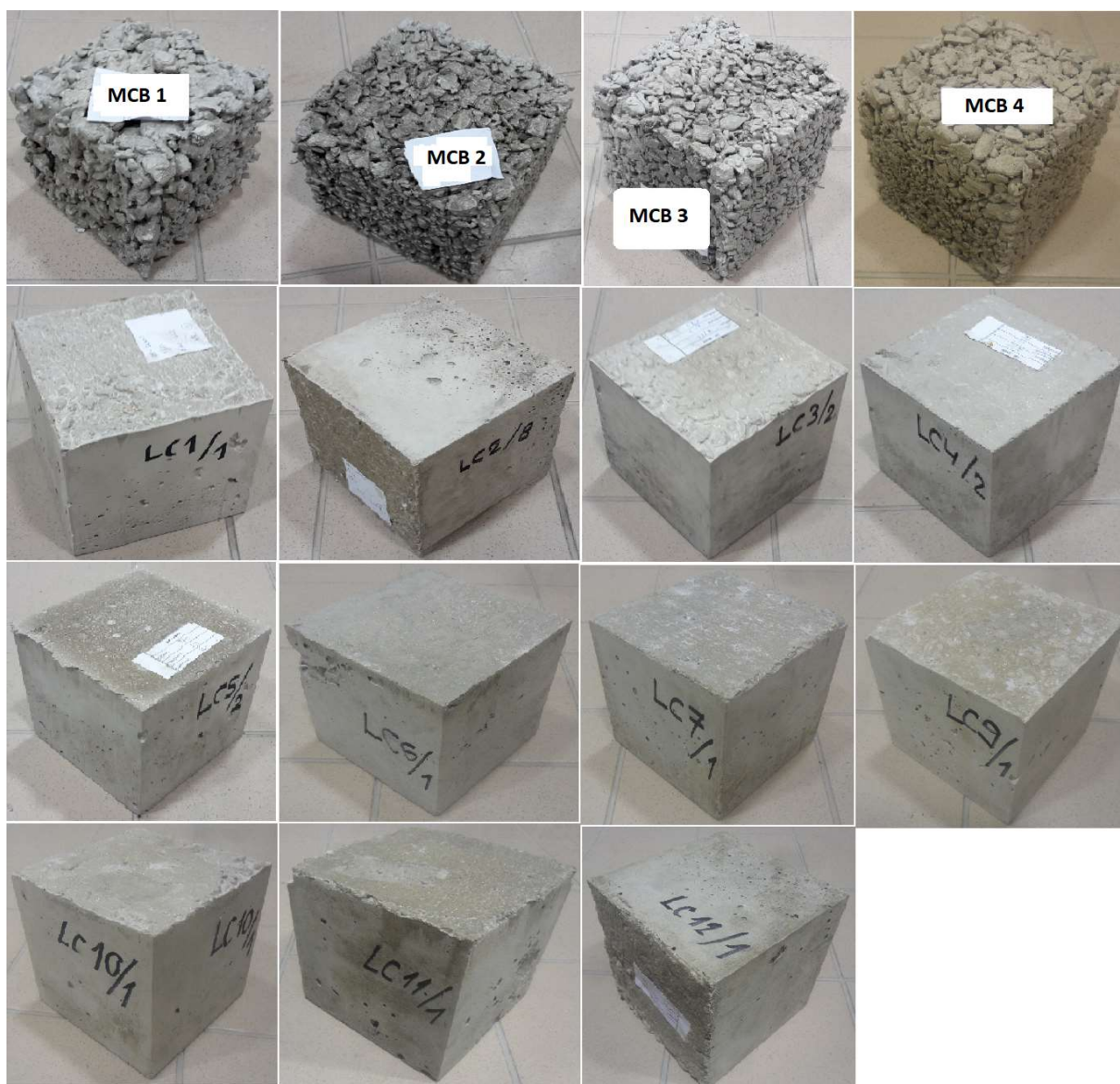
Tabulka 23: Pevnosti v tlaku MCB

beton	f_{C7} [MPa]	f_{C28} [MPa]
MCB1	1,0	1,0
MCB2	1,5	1,4
MCB3	1,0	1,1
MCB4	0,9	0,9

Tabulka 24: Pevnosti v tlaku LC

beton	f_{C7} [MPa]	f_{C28} [MPa]
LC1	9,8	12,9
LC2	6,6	8,2
LC3	7,2	8,8
LC4	8,7	10,5
LC5	10,0	11,6
LC6	8,3	11,0
LC7	14,2	14,9
LC9	6,8	9,4
LC10	8,5	10,8
LC11	11,3	12,9
LC12	8,3	9,8

Z tabulky 23 vidíme pevnosti betonů MCB, s délkou zrání se již pevnosti téměř nezvyšovaly. Jak již bylo zmíněno, zlehka obalená zrna lehkého kameniva cementem jsou spojeny jen na kontaktních místech. Při zatěžování je tedy napětí přenášeno pouze v těchto místech a pevnosti betonu jsou tímto značně omezeny. V tabulce 24 jsou uvedeny hodnoty pevnosti v tlaku u betonů LC, kde je viditelný růst pevností v tlaku během zrání, pevností opět korespondují s objemovými hmotnostmi. Nejvyšší pevnosti bylo dosaženo u receptury LC 7. Hodnota pevnosti v tlaku po 28 dnech se blíží 15 MPa.



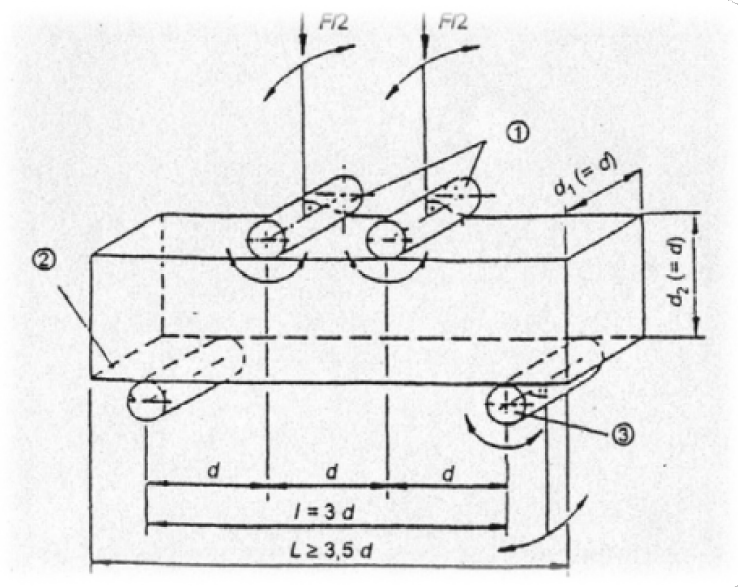
Obrázek 27: Zkušební tělesa pro zkoušku pevnosti v tlaku, krychle o hraně 150 mm



Obrázek 28: Zkušební těleso po vystavení pevnosti v tlaku

Stanovení pevnosti v tahu ohybem po 28 dnech zrání

Tato zkouška se prováděla v souladu s normou ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu-část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Na trámcích o rozměrech 100×100×400 mm, neposuvným měřítkem změřily příčné rozměry trámce a provedla zkouška v tahu 4 bodovým ohybem, jedná se tedy o zatěžování dvěma břemeny, viz obrázek 29.



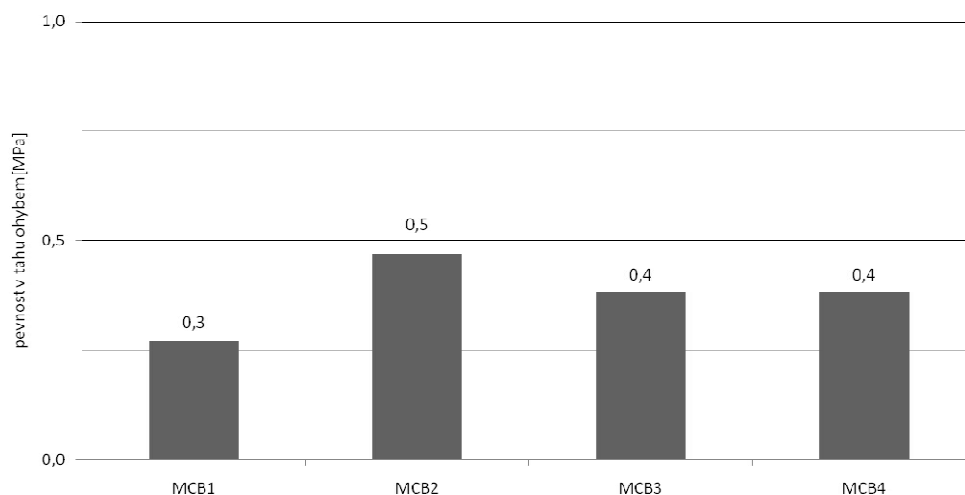
Obrázek 29: Schéma zatěžování 2 břemeny

Pevnost v tahu za ohybu se vypočítá z výpočtového vztahu:

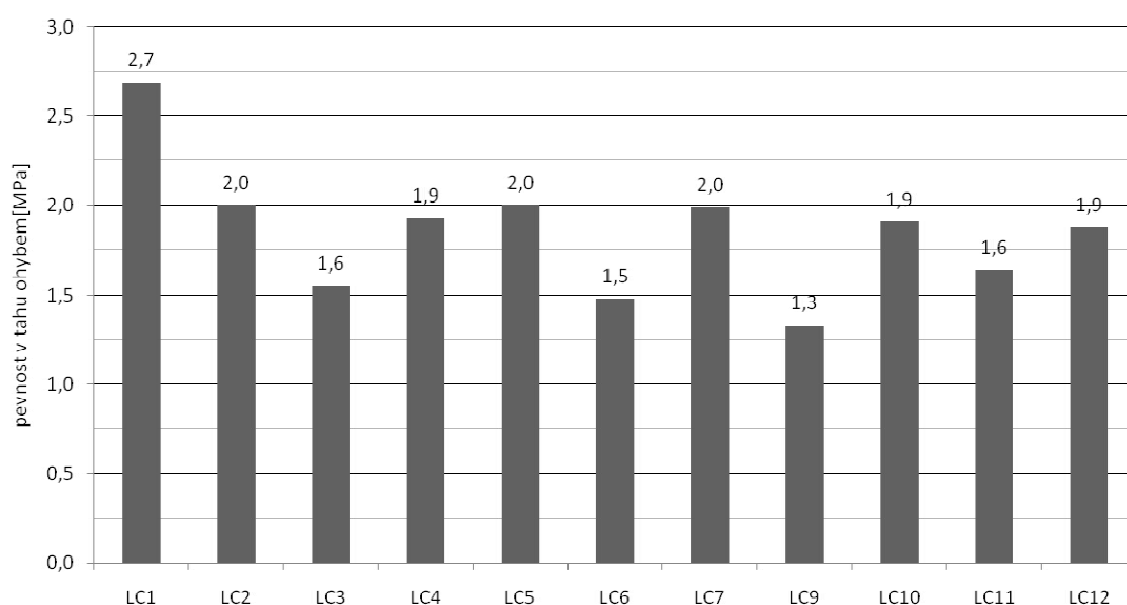
$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

kde:

- f_{cf} ... pevnost betonu v tahu ohybem [MPa],
- F ... maximální zatížení při porušení tělesa [N],
- l ... vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm],
- d_1, d_2 ... rozměry příčného řezu tělesa [mm].



Obrázek 30 Pevnosti v tahu ohybem MCB po 28 dnech zrání



Obrázek 31: Pevnosti v tahu ohybem LC po 28 dnech zrání

Pevnosti v tahu ohybem jsou dle očekávání také odlišné u obou druhů betonu. Betony MCB se pohybují od 0,3 MPa do 0,5 MPa, takto malé hodnoty lze zdůvodnit opět jejich strukturou. Obalená zrna lehkého kameniva jsou pojeny pouze na kontaktních místech a k porušení tedy dojde brzy (za nízké síly) právě v těchto místech. Tento fakt je patrný i na obrázku 32, vidíme lom právě na kontaktních místech, tedy kde se pojí zrna kameniva na styku. Jiný lom můžeme vidět na obrázku 33. U betonů LC, kde dochází k lomu napříč strukturou zrn, k takovému lomu docházelo u betonů LC, aby takový lom vznikl, byla již potřebná větší zatěžovací síla, z toho vyplývají dosažené pevnosti v tahu ohybem, pohybující se od 1,3 MPa do 2,7 MPa.



Obrázek 32: Zkušební těleso MCB, trámec (100×100×400 mm) po vystavení pevnosti v tahu ohybem



Obrázek 33: Zkušební těleso LC, trámec (100×100×400 mm) po vystavení pevnosti v tahu ohybem

Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti se označuje řeckým písmenem λ a uvádí se v jednotkách W/(mK). Součinitel tepelné vodivosti vyjadřuje množství tepla, které za jednotku času (1 sekunda) projde jednotkou plochy (1 čtverečním metrem) homogenní desky jednotkové tloušťky (1 metr), jejíž stěny mají po celé ploše stejnou teplotu, je-li mezi nimi udržován jednotkový teplotní rozdíl (1 kelvin). Součinitel tepelné vodivosti se měřil přístrojem Isomet 2114 od firmy Applied Precision. Je to přenosný ruční přístroj pro přímé měření součinitele tepelné vodivosti λ . Jedná se o nestacionární metodu měření. K dispozici má dva typy sond

určené k jinému rozhraní měření, jedna sonda měří tepelnou vodivost $<0,2 \text{ W/(mK)}$ a druhá v rozsahu $0,2\text{--}3,0 \text{ W/(mK)}$. Přístroj můžeme vidět na obrázku 34.



Obrázek 34: Přístroj Isomet 2114

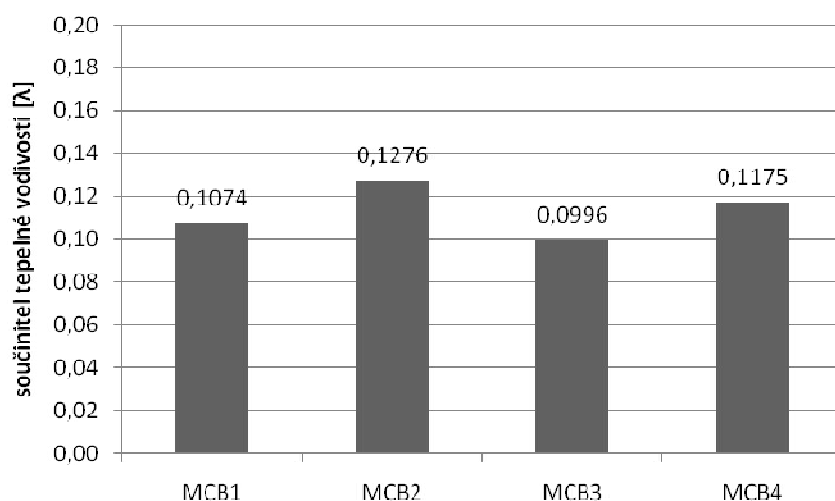
Zkušebním vzorkem k tomuto měření sloužila krychle o hraně 150 mm, kde na řezu každé poloviny krychle a následném vybroušení obou ploch bylo provedeno měření součinitele tepelné vodivosti. Pro měření byly všechny vzorky vysušeny, a to z důvodu, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků rozdílnou vlhkostí materiálu. Výsledky by také zkresloval cementový tmel, proto se vzorky pro měření vyřezávaly a brala střední vyřezaná část z krychlí. Na připravených vzorcích proběhlo měření z obou stran, tedy na jednom vzorku se měřilo vždy 2x. Z jednoho měření dostaneme celkem 3 hodnoty, z toho vyplývá celkem 6 hodnot od každého analyzovaného betonu.

Tabulka 25: Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ u MCB

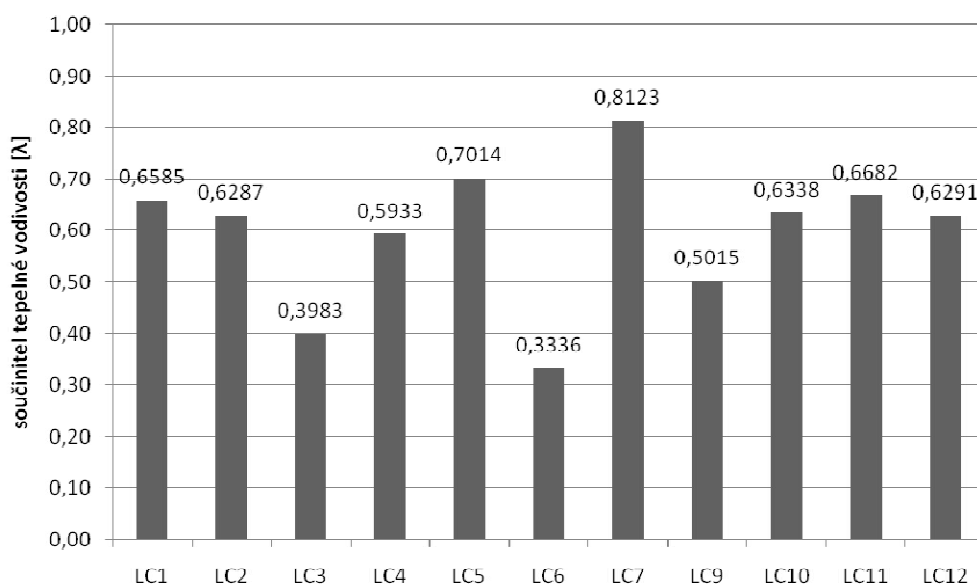
beton	$\lambda \text{ [W/mK]}$	Dzb28 $[\text{kg/m}^3]$
MCB1	0,1074	470
MCB2	0,1276	560
MCB3	0,0996	510
MCB4	0,1175	530

Tabulka 26: Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ u LC

beton	λ [W/mK]	Dzb28 [kg/m ³]
LC1	0,6585	1500
LC2	0,6287	1430
LC3	0,3983	1280
LC4	0,5933	1350
LC5	0,7014	1480
LC6	0,3336	1160
LC7	0,8123	1570
LC9	0,5015	1370
LC10	0,6338	1400
LC11	0,6682	1450
LC12	0,6291	1410



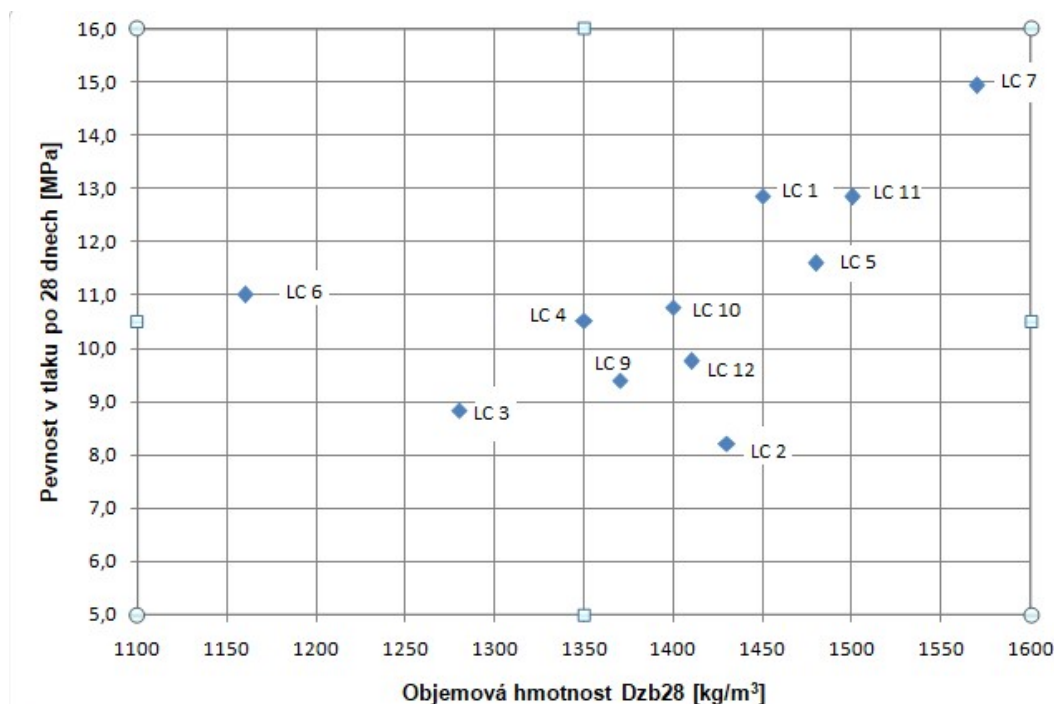
Obrázek 35: Součinitele tepelné vodivosti λ u MCB



Obrázek 36: Součinitele tepelné vodivosti λ u receptur LC

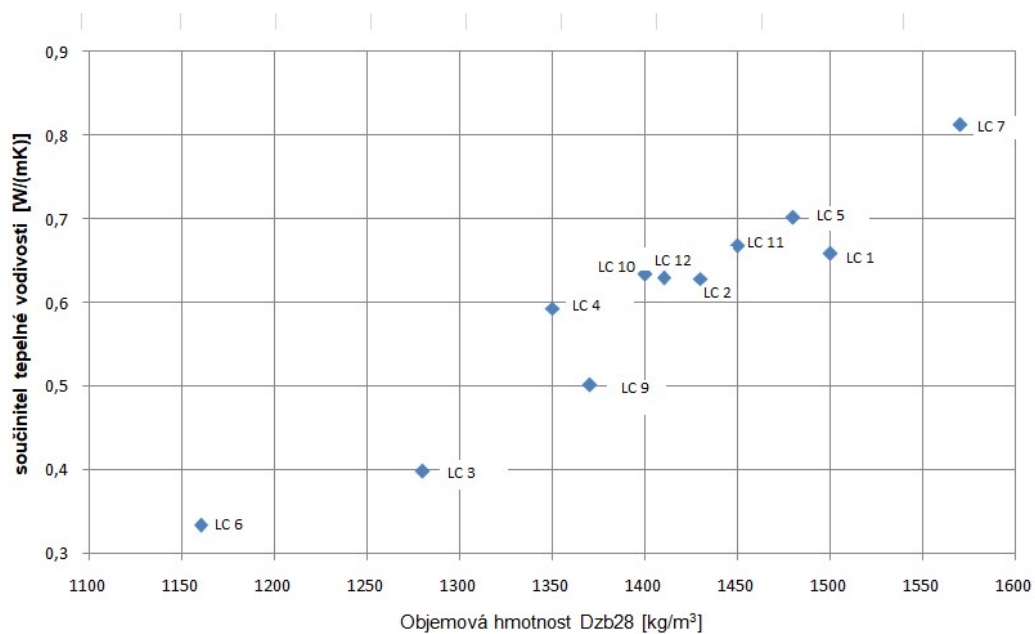
Z grafů na obrázcích 35 a 36 vidíme naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ . Na začátku je možná dobré si připomenout, že hodnota λ , běžného hutného betonu je kolem hodnoty 1,4 W/(mK). U betonů LC (graf 36) byly naměřeny hodnoty 0,3336-0,8123 W/(mK). Betony MCB (graf 35) se pohybovaly od 0,0996 W/(mK) do 0,1276 W/(mK). Podařilo se tedy výrazně zlepšit tepelně izolační vlastnosti betonu. Tabulky 25 a 26 zaznamenávají naměřené součinitele λ a také hmotnosti ztvrdlých betonů, abychom viděli korespondující závislost součinitele tepelné vodivosti s objemovou hmotností. Vidíme, že s klesající objemovou hmotností nám klesá součinitel tepelné vodivosti, tedy zlepšují se tepelně izolační vlastnosti.

Nakonec si uvedeme dvě závislosti, které jsou v této práci neustále skloňovány. První je závislost pevnosti v tlaku na objemové hmotnosti, na obrázku 37 vidíme, že betony s vyšší objemovou hmotností dosahují také vyšších pevností až na některé výjimky.



Obrázek 37: Pevnost v tlaku v závislosti na objemové hmotnosti

Jako druhou závislost si uvedeme součinitel tepelné vodivosti na objemové hmotnosti. Na obrázku 38 jasně vidíme, že se stoupající objemovou hmotností se zvyšuje součinitel tepelné vodivosti, tedy zhoršují se tepelné vlastnosti betonu.



Obrázek 38: Součinitele tepelné vodivosti λ v závislosti na objemové hmotnosti

9. DISKUZE A ZÁVĚR

V diplomové práci byla řešena problematika lehkých betonů s využitím lehkého kameniva na bázi pěnového skla. Především bylo řešeno vylehčení za použití lehkého kameniva z pěnového skla. Pěnové sklo je vyráběno z recyklovaného obalového skla, které je podrceno a pomleto a následnou homogenizací s kypřícími přísadami je expandováno v peci na větší celky pěnového skla. Vzniklým produktem je pěnové sklo, které je drceno a separováno na požadované frakce kameniva. Ze skelného recyklátu je využívána především část skelného recyklátu, která je obtížně zpracovatelná ve sklářském průmyslu a zde je bezproblémově zpracována. Takto připravené drcené kamenivo na bázi pěnového skla bylo využito v této práci pro návrh složení velmi lehkých mezerovitých betonů a lehkých hutných betonů.

V teoretické části práce byly shrnuty aktuální poznatky související s výrobou lehkého kameniva se zaměřením na pěnové sklo. Dále byly popsány vlastnosti pěnového skla a možná rizika, která mohou nastat při použití kameniv na bázi pěnového skla do betonu. Jedním z hlavních rizik, které je skloňováno v souvislosti použití kameniva ze skelného recyklátu v alkalickém prostředí, je alkalicko-křemičité rozpínání, kterému je také věnována část teoretické práce.

Praktická část práce byla zahájena, výběrem vstupních surovin, přesněji tedy cementu, jemného těžného kameniva, drceného kameniva z pěnového skla a plastifikační přísady. Ze vstupních surovin byla analýza zaměřena především na drcené pěnové sklo.

Praktická část diplomové práce je členěna do několika na sebe navazujících etap podle probíhajících experimentů. Byly stanoveny základní vlastnosti drceného kameniva na bázi pěnového skla dvou frakcí, které byly využity v této práci, konkrétně se jednalo o frakci 4-16 mm a 16-32 mm.

. Vlastnosti tohoto lehkého kameniva poukazují na velmi vhodné vylehčení betonu, díky velmi nízké objemové hmotnosti, což souvisí také s nízkou pevností zrn kameniva, která u frakce 4-16 činila 0,87 MPa, u frakce 16-32 hodnotu 0,89 MPa. Byl určen tvarový index obou frakcí. Frakce 4-16 byl tvarový index 68 %, toto číslo nám říká, že tato frakce není pro výrobu betonu vhodná, naopak frakce 16-32 měla tvarový index jen 12 % procent a její použití pro výrobu betonu by mělo být bez problému. Ale i přes to, bylo prokázáno při návrhu a výrobě lehkých mezerovitých i lehkých hutných betonů, že s kamenivem lze vyrobit betony,

kteře svými vlastnostmi nabízí možnost využití pro různé aplikace. Z důvodu možného vzniku alkalicko-křemičité reakce (ASR) pěnového skla v alkalickém prostředí cementového tmele, byla zkoušena dilatometrická reaktivnost kameniva s alkáliemi. Cílem bylo ověření, zda je použití kameniva ze skelného recyklátu vhodné do betonu, z hlediska jeho složení a možnosti následné reakce s alkáliemi v cementu. Byla provedena zkouška rozpínivosti maltových trámečků dle Technických podmínek Ministerstva dopravy, 16. Denní metoda maltových trámečků. Ukázala nízkou rozpínavost, přesněji $0,065 \% < 0,100$, což dle normy je hranice, nízké rizikovosti vzniku alkalicko-křemičité reakce.

V další části byly navrženy čtyři velmi lehké mezerovité betony (MCB) a jedenáct lehkých hutných betonů (LC). Mezerovité struktury betonů MCB bylo dosaženo vynecháním jemné frakce, bylo tedy využito pouze drcené lehké kamenivo z pěnového skla s velikostí nad 4 mm, které bylo pouze obaleno cementovým tmelem. U lehkých betonů (LC) byla struktura hutná, bez mezer, s využitím drobného těžného kameniva 0-4 mm, což je asi nejzásadnější rozdíl v návrhu složení těchto betonů.

Z navržených betonů MCB a LC byla vyrobena zkušební tělesa pro zkoušení betonů v čerstvém i ztvrdlém stavu. V čerstvém stavu byla provedena zkouška sednutí kužele, hodnota sednutí byla u MCB vždy 0 mm. Objemové hmotnosti v čerstvém stavu se u těchto betonů pohybovaly od 540 do 650 kg/m³, ve stavu ztvrdlém po 28 dnech od 470 do 560 kg/m³. Vidíme velmi nízké hodnoty objemových hmotností, které jsou dány strukturou MCB a použitím lehkého kameniva z pěnového skla. Byly stanoveny pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech zrání, přičemž po 7 dnech zrání se pevnosti v tlaku pohybovaly od 0,9 do 1,5 MPa, po 28 dnech zůstaly hodnoty téměř shodné, bez významnějších rozdílů. Lze tedy říci, že délka zrání na pevnosti neměla zásadní vliv. Pevnosti u MCB byly omezeny pevností zrn kameniva, ani větší dávky cementu neměly zásadní vliv na konečné pevnosti. Tyto betony byly koncipovány jako výplňové a tepelně izolační vrstvy, z tohoto důvodu by měly být dosažené pevnosti dostatečné. Pevnosti v tahu ohybem po 28 dnech u MCB dosahovaly hodnot 0,3–0,5 MPa. Nízké hodnoty korespondují s pevnostmi v tlaku a lze je odůvodnit, mezerovitou strukturou betonu. K lomu docházelo na kontaktních místech, kde byla zrna pojena cementovým tmelem. Naměřené hodnoty mechanických vlastností byly tedy dle očekávání nízké, protože cílené využití betonů MCB je jako tepelně izolační vrstva, proto jsou hlavním ukazatelem tepelně izolační vlastnosti. Součinitel tepelné vodivosti u MCB byl naměřen od 0,0996 do 0,1276 W/(mK). Tyto hodnoty jsou velmi zajímavé při srovnání s obyčejným betonem, kde se součinitel tepelné vodivosti pohybuje okolo 1,5 W/(mK). Je nutno říci, že dosažené tepelně izolační vlastnosti MCB jsou velmi dobré.

Vlastnosti a užití betonů lehkých hutných LC má zcela odlišná specifika, ve srovnání s betony MCB. Zde jsou očekávány vyšší mechanické vlastnosti při dosažení co možná nejlepších tepelně izolačních vlastností. Na čerstvém betonu LC byla zkouška sednutí závislá na více faktorech, největší vliv měl poměr jemného těžného kameniva frakce 0-4 mm a kameniva z pěnového skla. Z praktických zkušeností při výrobě betonů LC bylo zjištěno, že pokud bylo zastoupení kameniva z pěnového skla $< 30 \%$ z celkového podílu kameniva, byla dobrá zpracovatelnost (sednutí kužele od 30 do 150 mm). Přičemž dávka vody a plastifikační přísady se lišila jen minimálně a neměla by reologické chování čerstvé směsi zásadně ovlivnit. Objemové hmotnosti čerstvých betonů LC se pohybovaly od 1330 do 1650 kg/m³, ve ztvrdlém stavu pak 1160 – 1570 kg/m³. Pevnosti v tlaku po 7 dnech se vykazovaly hodnoty od 6,6 MPa do 14,2 MPa a po 28 dnech zrání od 8,2 po 14,9 MPa. Z hodnot je patrné, že u LC během zrání docházelo ke zvyšování pevností dle očekávání, na rozdíl od MCB, kde již k takovému růstu po 7 dnech nedocházelo. S vyšší tlakovou pevností bylo dosaženo i vyšších pevností v tahu ohybem, a to od 1,3 do 2,7 MPa. Mohli jsme zde také pozorovat odlišný lom než u MCB, K lomu docházelo napříč hutnou strukturou, tedy i napříč zrn kameniva z pěnového skla, na rozdíl od lomu na styku zrn, jak tomu bylo v případě lehkých mezerovitých betonů (MCB). Lze tedy usoudit, že limitující zde byla samotná pevnost lehkého kameniva z pěnového skla, která není příliš vysoká. To může být limitující pro návrh betonů s vyššími pevnostními charakteristikami. Na betonech LC byl také měřen součinitel tepelné vodivosti. Nebyly zde očekávány tak příznivé tepelně izolační vlastnosti jako tomu bylo u MCB, ale dosažené hodnoty byly odpovídající zvýšené objemové hmotnosti, což se potvrdilo z naměřených hodnot a stanovených závislostí. Součinitel tepelné vodivosti se zde pohyboval od 0,3336 do 0,8123 W/(mK). Tepelně izolační vlastnosti se tedy podařilo snížit i u betonů LC, a to velmi výrazně. Součinitel tepelné vodivosti tedy jednoznačně koresponduje s naměřenými hodnotami na jednotlivých betonech, tedy s klesající objemovou hmotností se zlepšovaly tepelně izolační vlastnosti, bylo tomu tak u receptur MCB i LC.

V rámci praktické části práce se podařilo navrhnout složení betonů tak, že je možné dosáhnout velmi dobrých tepelně izolačních vlastností, za velmi nízké objemové hmotnosti, což se potvrdilo v případě navržených a vyrobených velmi lehkých betonů (MCB), kde bylo použito pouze hrubé drcené kamenivo z pěnového skla. V oblasti lehkých betonů (LC) bylo dosaženo velmi zajímavých výsledků s využitím drceného kameniva z pěnového skla. Betony LC vykazovaly dobrý poměr mechanických vlastností a tepelně izolačních vlastností s nízkou objemovou hmotností.

Na základě navržených a vyrobených betonů v této práci, lze říci, že je možné účinně regulovat poměr mezi tepelně izolačními vlastnostmi a mechanickými vlastnostmi pomocí vhodného složení betonu s využitím lehkého kameniva z pěnového skla a lze připravit vhodný návrh pro konkrétní aplikaci. Velký potenciál skýtá toto kamenivo především v oblasti dobrých tepelně izolačních vlastností a nízké objemové hmotnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CHEER-GERM GO, JUN-REN TANG, JEN-HAO CHI, CHENG-TUNG CHEN, YUE-LIN HUANG Construction and Building Materials: Fireresistancepropertyofreinforcedlightweightaggregateconcretewall[online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [2] TASDEMIR C., SENGUL O, TASDEMIR M. A. Energy and Buildings: A komparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [3] ČSN EN 206+A1, Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda 2017
- [4] DROCHYTKA, R., MATULOVÁ Lehké stavební látky, Modul M01, VUT FAST Brno, 2006
- [5] Příručka Liapor [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.betonserver.cz/Katalogy/Readymix/Prirucka_liapor.pdf
- [6] ČSN 73 2402 Provádění a kontrola konstrukcí z lehkého betonu z umělého pórovitého kameniva. 1989.
- [7] NADESAN M. S., DINAKAR P. Construction and Building Materials: Structural concrete using flush lightweight aggregate [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [8] JAHN, Jeroným. Možnosti využití lehkého kameniva z pěnového skla pojeného cementem. 2016. Bakalářská práce. VUT Brno, fakulta stavební. Vedoucí práce Sedlmajer.
- [9] Přednáška ČVUT [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaskaX_IZMA.pdf
- [10] Misapor [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://www.misapor.ch/DE/Schaumglas/>
- [11] Refaglass [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.refaglass.cz/>
- [12] Foamglas [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: https://cz.foamglas.com/cscz/stavebn_aplikace/
- [13] Poraver [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://poraver.com/>
- [14] Liaver [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://www.liaver.com/liaver/>
- [15] Liapor [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://www.liapor.cz/>

- [16] Agloporit [online]. [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://agloporit.cz/lehke-umele-kamenivo/>
- [17] SEIDLOVÁ, Zuzana. Experimentální výzkum alkalicko-křemičité reaktivnosti vulkanických hornin. Praha, 2010. Diplomová práce. Univerzita Karlova. Vedoucí práce Doc. Mgr. Richard Přikryl, Dr.
- [18] MODRÝ, S.: Reakce kameniva s alkáliemi v betonu, 1. Vydání. Praha: SEKURKON, 1999, 94 stran, ISBN 80-2384313-3
- [19] HROMÁDKO J.: Poruchy betonu způsobené alkalicko-křemičitou reakcí. Sborník konference CONCON, Praha, 2/2000
- [20] BUMAIS, G., D. BAJARE, J. LOCS a A. KORJAKINS. Construction and Building Materials: Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structures of lightweight concrete [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [21] SHAFIGH, P., CHAI, L. J., MAHMUD, H.B., NOMELI, M.A. Building engineering: A comparison study of the fresh and hardened properties of normal weight and lightweight aggregate concretes [online]. [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [22] YU, Q.L., SPIESZ, P., BROUWERS, H.J.H. Cement and concrete composites: Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation [online]. [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [23] EKOLU, S., RAGGOSI, G., HOOTON, D. Materials Characterization: Long-term mitigating effect of lithium nitrate on delayed ettringite formation and ASR in concrete – Microscopic analysis [online]. [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [24] BAI, J., YANG, X., XU, S., JING, W., YANG, J. Materials Letters: Preparation of foam glass from waste glass and flyash [online]. [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [25] REAL, S., GOMES, M.G., RODRIGUES, A.M., BOGAS, J.A. Construction and Building Materials: Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings [online]. [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [26] Technické podmínky ministerstva dopravy TP137. 2003. citace

SEZNAM TABULEK

Teoretická část

Tabulka 1: Pevnostní třídy lehkých betonů	14
Tabulka 2: Třídy objemové hmotnosti hutných lehkých betonů	15
Tabulka 3: Rozdělení lehkých betonů dle způsobu vylehčení	16
Tabulka 4: Vlastnosti keramického kameniva Liapor	20
Tabulka 5: Vlastnosti lehkého pórovitého kameniva Agloporit	22
Tabulka 6: Vlastnosti lehkého pórovitého kameniva z pěnového skla	26
Tabulka 7: Tabulka vlastností kameniv Poraver a Liaver	28
Tabulka 8: Vlastnosti lehkého a izolačního betonu z Liaveru	29
Tabulka 9: Rozdělení hornin dle reaktivnosti kameniva s alkáliemi	33

Praktická část:

Tabulka 10: Sypné hmotnosti jednotlivých frakcí	41
Tabulka 11: Objemové hmotnosti jednotlivých frakcí	42
Tabulka 12: Stanovení pevnosti zrn kameniva	43
Tabulka 13: Tvarový index	43
Tabulka 14: Stanovení nasákavosti zrn kameniva	44
Tabulka 15: Procentuální zastoupení jednotlivých frakcí kameniva	45
Tabulka 16: Vypočítané délkové změny L, v jednotlivých dnech měření	46
Tabulka 17: Klasifikace kameniva do betonu z hlediska rizika ASR	47
Tabulka 18: Receptury velmi lehkých mezerovitých betonů MCB	47
Tabulka 19: Receptury lehkých hutných betonů LC	49
Tabulka 20: Procentuální zastoupení jednotlivých druhů kameniv	51
Tabulka 21: Objemové hmotnosti MCB	58
Tabulka 22: Objemové hmotnosti LC	58
Tabulka 23: Pevnosti v tlaku MCB	60
Tabulka 24: Pevnosti v tlaku LC	60
Tabulka 25: Součinitele tepelné vodivosti λ u MCB	65
Tabulka 26: Součinitele tepelné vodivosti λ u LC	66

SEZNAM OBRÁZKŮ

Teoretická část

Obrázek č 1: Keramické kamenivo Liapor	20
Obrázek č 2: Kamenivo z popílku Agloporit	22
Obrázek č 3: Kameniva z pěnového skla	23
Obrázek č 4: Namletá skelná moučka požadované granulometrie	24
Obrázek č 5: Schéma výroby drceného pěnového skla	25
Obrázek č 6: Schéma výroby oválného kameniva z pěnového skla	27
Obrázek č 7: Detailní pohled na strukturu oválného kameniva z pěnového skla	28
Obrázek č 8: Struktura betonu z Liaveru	29

Praktická část:

Obrázek č 9: Metodika práce a její jednotlivé etapy	38
Obrázek č 10: Kamenivo z pěnového skla frakce 16-32 mm	39
Obrázek č 11: Křivka zrnitosti frakce 4-16 mm	40
Obrázek č 12: Křivka zrnitosti frakce 16-32 mm	40
Obrázek č 13: Závislost průměrné délkové změny L na stáří vzorku.	46
Obrázek č 14: Vzorky velmi lehkých mezerovitých betonů MCB	14
Obrázek č 15: Vzorky lehkých hutných betonů LC	49
Obrázek č 16: Sednutí kužele lehkých betonů LC	52
Obrázek č 17: Objemová hmotnost ČB u MCB	53
Obrázek č 18: Objemová hmotnost ČB u LC	54
Obrázek č 19: Objemové hmotnosti D_{ZB7} , MCB	55
Obrázek č 20: Objemové hmotnosti D_{ZB7} , LC	55
Obrázek č 21: Pevnosti betonu v tlaku f_{C7} betonů MCB	56
Obrázek č 22: Pevnosti betonu v tlaku f_{C7} betonů LC	56
Obrázek č 23: Objemové hmotnosti D_{ZB28} , MCB	57
Obrázek č 24: Objemové hmotnosti D_{ZB28} , LC	58
Obrázek č 25: Pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání, betonů MCB	59
Obrázek č 26: Pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání, betonů LC	59
Obrázek č 27: Zkušební tělesa, krychle o hraně 150 mm	61
Obrázek č 28: Zkušební těleso po vystavení pevnosti v tlaku	61
Obrázek č 29: Schéma zatěžování 2 břemeny	62
Obrázek č 30: Pevnosti v tahu ohybem MCB po 28 dnech zrání	63

Obrázek č 31: Pevnosti v tahu ohybem LC po 28 dnech zrání	63
Obrázek č 32: Zkušební těleso MCB, trámec zatížení	64
Obrázek č 33: Zkušební těleso LC, trámec zatížení	64
Obrázek č 34: Přístroj Isomet 2114	65
Obrázek č 35: Součinitele tepelné vodivosti λ u MCB	66
Obrázek č 36: Součinitele tepelné vodivosti λ u receptur LC	66
Obrázek č 37: Pevnost v tlaku v závislosti na objemové hmotnosti	67
Obrázek č 38: Souč. tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti	68